Machine Translated by Google

Encyclopédie

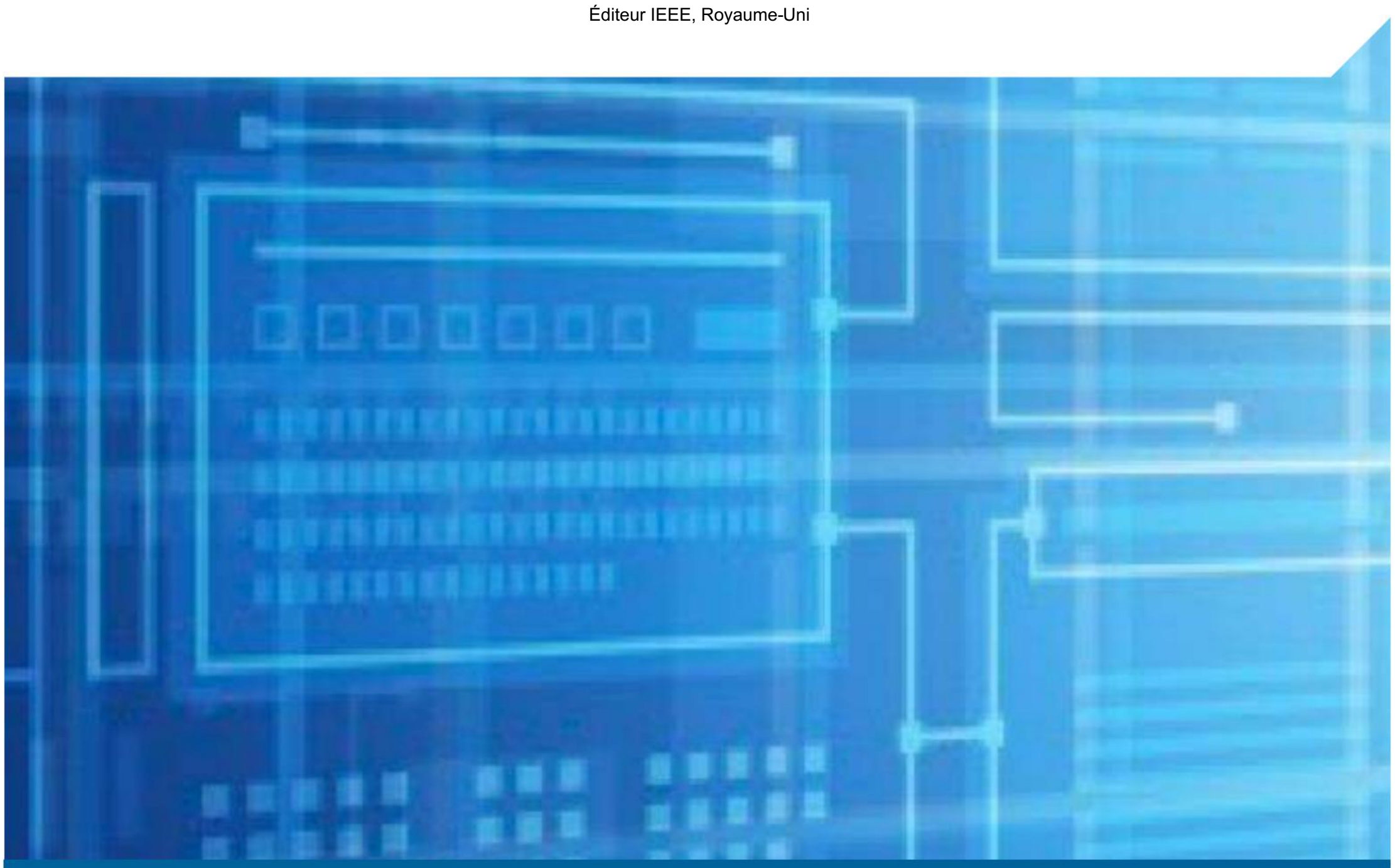
Auteur et éditeur

Elzein Salah Elzein

Membre IEEE

- Articles en électronique

Éditeur IEEE, Royaume-Uni



Ce contenu est confidentiel

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Saisie sélective de pièces de forme complexe à l'aide de la topologie Extraction du squelette

Andrea Pennisi [1], Monica Siléo [2], Domenico Daniele Bloisi [1] et Francesco Pierri 2,*

[1] Département des sciences humaines et sociales internationales, UNINT Université internationale de Rome, 00147 Rome, Italie ; andrea.pennisi@gmail.com (AP); domenico.bloisi@unint.eu (DDB)
[2] École d'ingénierie, Université de la Basilicate, 85100 Potenza, Italie ; monica.sileo@unibas.it
* Correspondance : francesco.pierri@unibas.it ; Tél. : +39-0971-205020

Résumé : Pour améliorer l'autonomie et la flexibilité des systèmes robotiques, un rôle crucial est joué par la capacité de percevoir et de saisir des objets. Plus en détail, les robots manipulateurs doivent détecter la présence des objets dans leur espace de travail, identifier le point de préhension et calculer une trajectoire pour s'approcher des objets avec une pose de l'effecteur final adaptée à l'exécution de la tâche. Ces tâches peuvent être difficiles en présence de géométries complexes, où plusieurs points de préhension candidats peuvent être détectés. Dans cet article, nous présentons une nouvelle approche pour traiter les pièces automobiles de forme complexe, consistant en une méthode basée sur l'apprentissage profond pour l'extraction du squelette topologique et un mécanisme de sélection de pose de préhension active. En particulier, nous utilisons une version modifiée de l'algorithme bien connu Lightweight OpenPose pour estimer le squelette topologique de pièces automobiles réelles. Le squelette estimé est utilisé pour sélectionner la meilleure pose de préhension pour l'objet à portée de main. Notre approche est conçue pour être plus efficace sur le plan informatique par rapport aux autres méthodes de détection de pose de préhension existantes. Des expériences quantitatives menées avec un manipulateur 7 DoF sur différents composants automobiles réels démontrent l'efficacité de l'approche proposée avec un taux de réussite de 87,04 %.

Mots clés : vision par ordinateur pour la fabrication ; apprentissage profond en matière de saisie et de manipulation ; apprentissage visuel

check for updates

Citation : Pennisi, A. ; Siléo, M. ; Bloisi, DD; Pierri, F. Saisie sélective de pièces de forme complexe utilisant l'extraction de squelette topologique. Électronique 2024, 13, 3021. https://doi.org/10.3390/electronics13153021

Rédacteurs académiques : Krzysztof Okarma et Piotr Lech

Reçu : 4 juin 2024
Révisé : 23 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les composants aux formes géométriques complexes sont largement utilisés dans l' industrie manufacturière, par exemple dans le secteur automobile. Utiliser des robots pour manipuler des pièces de formes complexes reste une tâche difficile en raison de problèmes de perception, de planification et de raisonnement. En particulier, les incertitudes quant à la position de l'objet à saisir et la perception du bruit dû aux matériaux réfléchissants sont des défis courants dans les scénarios industriels.

La saisie d'objets aux géométries complexes peut être grossièrement classée en méthodes basées sur des modèles qui s'appuient sur des modèles 3D préexistants et en techniques basées sur l'apprentissage qui utilisent l'apprentissage automatique pour prédire les points de saisie. Les deux approches doivent percevoir l' environnement externe à l'aide d'algorithmes basés sur la vision, basés sur des caméras et des nuages de points pour la détection, la segmentation et l'estimation de pose d'objets, comme dans [1,2], ou de stratégies basées sur le toucher, comme dans [3]. , nécessitant des capteurs pour la mesure de la force, le retour haptique et la détection des glissements. Les approches hybrides combinent plusieurs méthodes pour plus de robustesse, notamment la fusion multi-capteurs et la perception active.

Dans cet article, nous présentons un pipeline complet pour la manipulation de pièces automobiles de forme complexe à l'aide d'un robot manipulateur à 7 DoF. Nous adoptons notamment une approche basée sur le deep learning pour concevoir un détecteur multi-objets visant à extraire le squelette topologique appartenant à la pièce à saisir pour estimer précisément sa pose. Après avoir estimé la pose, une sélection de la meilleure pose de préhension est effectuée pour augmenter les chances de saisir l' objet avec succès.

L'apport de ce travail est triple.

Machine Translated by Google

1. Le processus d'extraction du squelette fournit une représentation de la pose de l'objet dans l'espace 3D. Ainsi, cela permet également une estimation précise de l'orientation de l'objet.
2. Nous utilisons MobileNetV3 pour remplacer le squelette d'origine MobileNetV1 dans le réseau d'extraction de squelette, et nous le personnalisons pour détecter le squelette d'objets industriels à géométrie complexe tant en vue de face qu'en vue de dos, même si les objets ont des formes différentes de chaque côté.

3. La sélection de la pose de préhension est effectuée selon une approche dynamique. Cela signifie qu'une erreur dans l'extraction du squelette est détectée de manière autonome et que le robot modifie activement sa position pour mieux effectuer la préhension.

Nous avons mené plusieurs expérimentations avec des pièces automobiles réelles pour valider notre approche, qui permet de détecter les points clés de l'objet depuis des vues inversées, sans aucune contrainte.

Le reste de l'article est organisé comme suit. La section 2 contient une brève description des travaux connexes existants. Notre méthode est présentée dans la section 3. Les expériences démontrant l'efficacité de l'approche proposée sont présentées dans la section 4. Enfin, les conclusions et les orientations futures sont tirées dans la section 5.

2. Travaux connexes

Ces dernières années, grâce à la disponibilité de GPU puissants, les méthodes d'apprentissage profond sont devenues adaptées à la détection des points de préhension. Ils se sont révélés capables de remplacer les approches analytiques traditionnelles basées sur les propriétés géométriques, les modèles physiques et l'analyse des forces. Une architecture de réseau neuronal convolutif (CNN) nommée GraspNet, capable de segmenter des régions saisissables à la surface des objets, a été présentée dans [4]. Dans [5], un CNN, en combinaison avec les informations fournies par une caméra de profondeur, a été utilisé pour détecter la présence de l'objet et la meilleure pose de préhension.

Plusieurs approches ont été proposées pour améliorer la précision des CNN profonds, voir par exemple [6,7], mais elles nécessitent généralement un temps de calcul long (c'est-à-dire de l'ordre de la seconde).

Des approches plus efficaces, nécessitant uniquement des images de profondeur, ont été proposées dans [8,9]. Plus en détail, dans [8], un réseau neuronal à convolution profonde a été formé dans un environnement simulé pour apprendre les fonctionnalités pertinentes pour la saisie et renvoyer une solution à saisie unique pour chaque objet. Dans [9], le réseau neuronal convolutif à saisie générative (GG-CNN) a été proposé. Il permet une évaluation directe de la qualité de saisie et de la pose des saisies pour chaque pixel d'une image de profondeur d'entrée, et il est suffisamment rapide pour effectuer une saisie dans des environnements dynamiques. Les performances du GG-CNN ont été améliorées par l'introduction du GG-CNN2 [10], qui est un CNN basé sur l'architecture de segmentation sémantique de [11].

Une caractéristique commune des méthodes basées sur l'apprentissage profond pour la détection des points de saisie est la nécessité de calculer la valeur de qualité de saisie pour chaque pixel de l'image en question, ce qui prend extrêmement de temps.

Lorsque la connaissance de l'objet et les candidats à la pose de préhension ne sont pas disponibles, il est possible de se rapprocher de l'objet en utilisant des primitives de forme, par exemple en utilisant des mesures multivues [12] ou en identifiant des caractéristiques dans des données sensorielles [13]. La méthode proposée dans [14] consiste à sélectionner des candidats à la pose de préhension après avoir localisé les zones où une préhension réussie avait déjà été expérimentée. Dans [1], la saisie d'objets partiellement connus dans des environnements non structurés est proposée sur la base d'une extension au contexte industriel de la technique bien connue de soustraction de fond [15]. Grâce à la diffusion de capteurs de profondeur à faible coût, de nombreux algorithmes d'enregistrement 3D ont été exploités pour résoudre le problème de la saisie d'objets. Par exemple, dans [2], un modèle de l'objet à saisir est généré à l'aide d'un ensemble de nuages de points acquis à partir de différentes positions, et la pose de préhension nominale est fixe. Par la suite, ce modèle est comparé à la vue de l'objet d'exécution pour calculer la pose de préhens

Dans ce travail, nous proposons une approche basée sur le squelette pour détecter les poses de préhension, qui est intrinsèquement moins exigeante en termes de calcul en raison de la représentation compacte de l'objet via le squelette.

Machine Translated by Google

Une comparaison qualitative et quantitative entre notre approche et les articles les plus pertinents décrits dans cette section est présentée dans le tableau 1. Cette comparaison prend en compte compte non seulement des résultats mais aussi des limites de chaque travail.

Tableau 1. Tableau comparatif entre différentes approches de saisie d'objets.

Méthodes	Applications	Résultats quantitatifs	Limites
Architecture CNN avec un DDF module [4]	Saisie robotique en temps réel	90% de précision sur Cornell saisir l'ensemble de données	Erreur dans la prévision de l'orientation pour quelques objets
Structure basée sur plus rapide R-CNN et DACAB [5]	Saisir des objets avec un mobile manipulateur	86,3% de taux de réussite	Méthode de recherche inefficace
GQ_CNN pour classer robuste saisir [6]	Saisir des objets ménagers	99% de précision	Temps de calcul long
DCNN basé sur des images de profondeur pour prédire la pose de préhension [8]	Saisir des objets inconnus	92 % (70 %) de précision avec de forme cylindrique objets (en forme de boîte)	Génération d'une saisie unique solution pour un seul objet
NN pour l'apprentissage du prototype pièces [14]	Saisir des objets similaires	N / A	Saisir des formes complexes des objets avec du jamais vu caractéristiques.
Squelette topologique extraction (ce travail)	Saisir des formes complexes pièces automobiles	87,04% de taux de réussite	Il faut un bon appareil photo étalonnage

3. Méthode proposée

La figure 1 montre l'architecture fonctionnelle globale de notre approche. Il est composé de quatre principaux modules, à savoir l'acquisition de données visuelles, l'extraction de squelettes topologiques, la saisie Sélection de pose et préhension du robot. Chaque module est détaillé ci-dessous.

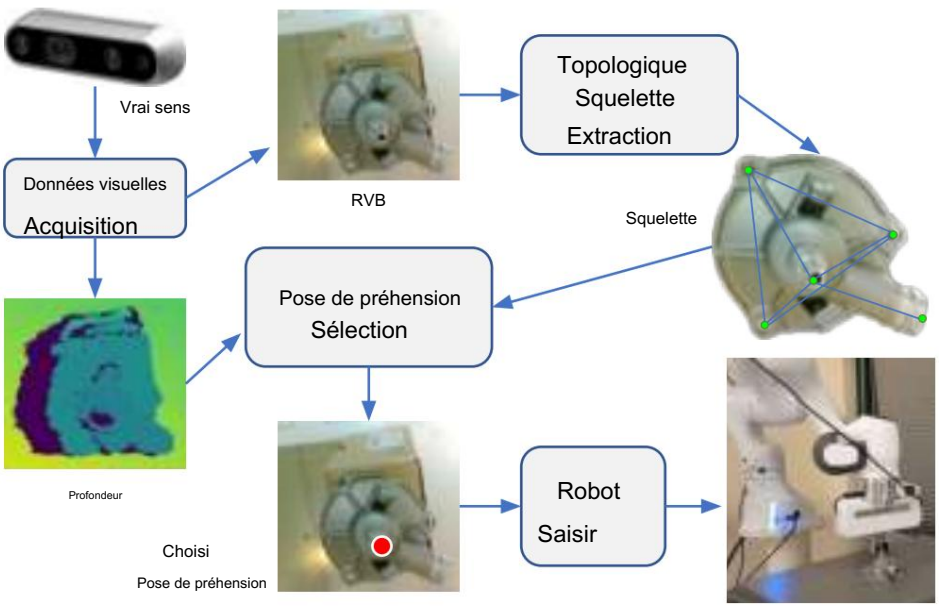


Figure 1. Architecture fonctionnelle de l'approche proposée.

Machine Translated by Google

3.1. Acquisition de données

visuelles Les données visuelles (RVB et profondeur) sont acquises à l'aide d'une caméra Intel Realsense D435 RGBD , montée sur l'effecteur final via un support imprimé en 3D dans la configuration dite œil dans la main . La figure 2 montre les cadres de référence attachés à l'effecteur terminal du robot, Fe , et à la caméra, Fc.

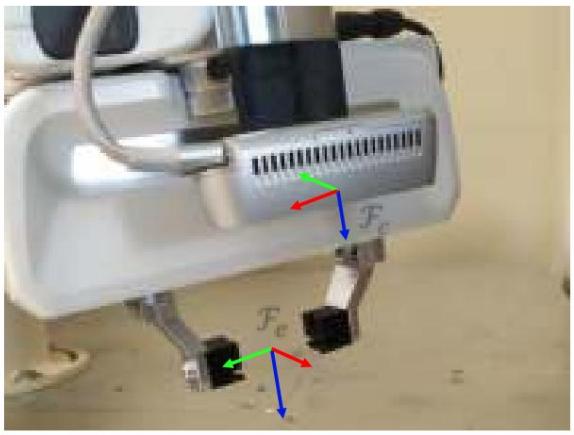


Figure 2. Cadres de référence de l'effecteur final et de la caméra.

La caméra Intel Realsense D435 a une distance de profondeur minimale au-delà de laquelle elle n'est pas en mesure de fournir une mesure de profondeur approximativement égale à 28 cm et l'acquisition des données de la caméra nécessite la bibliothèque realsense-ros puisque la communication entre les modules s'effectue via le système d'exploitation du robot (ROS). La caméra a été préalablement calibrée à l'aide de 30 images d'un motif plat en échiquier 2D. Le processus d'étalonnage comprend à la fois des étalonnages intrinsèques et extrinsèques. Le premier vise à déterminer les paramètres de la caméra qui décrivent comment la caméra transforme les coordonnées 3D de la scène en coordonnées 2D de l'image, comme la distance focale, le point principal et les distorsions optiques, tandis que le second fournit les paramètres. qui décrivent la transformation rigide qui mappe les coordonnées 3D du monde réel aux coordonnées 3D du système de référence de la caméra. La mise en œuvre de la procédure de calibrage proposée par la bibliothèque VISP [16], basée sur [17,18], a été adoptée en utilisant un échiquier composé de 9 × 6 carrés de dimensions 0,02645 m.

Il convient de rappeler qu'une bonne procédure d'étalonnage est cruciale pour le succès de la procédure de préhension car elle garantit une perception précise de l'environnement, permettant une identification et un positionnement précis des points dans un espace tridimensionnel pour une manipulation réussie.

3.2. Extraction du squelette

topologique La méthode proposée a été développée pour des objets qui :

• sont rigides, car non applicables aux objets déformables ; • ne
sont pas parfaitement symétriques car bien qu'il soit possible de définir un squelette topologique non symétrique , le détecteur peut devenir confus lors du processus d'extraction en raison de caractéristiques symétriques.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur de véritables pièces automobiles, notamment deux couvercles de séparateur d'huile de carter en fonte et en plastique et un tuyau d'air. Les objets sélectionnés ont un niveau de difficulté croissant. Le premier objet, le couvercle du séparateur d'huile du carter en fonte, présente un haut degré de symétrie avec de multiples points de préhension et peut être saisi par une partie cylindrique, réduisant ainsi l'impact des erreurs d'orientation du robot autour de l'axe de l' axe. Le deuxième objet, le couvercle en plastique du séparateur d'huile du carter, présente également un degré élevé de symétrie avec différents points de préhension mais doit être saisi avec une orientatio Enfin, le conduit d'air a une forme complexe, manque de symétrie et ne dispose que de deux points de préhension disponibles, ce qui représente la tâche la plus difficile pour le robot.

Machine Translated by Google

Nous avons décidé de modéliser leurs squelettes en considérant quelques points clés, dont certains correspondent aux points de préhension potentiels pour soulever cet objet avec le robot manipulateur (voir la partie supérieure droite de la figure 1). Pour détecter le squelette topologique (TS) des objets à saisir, nous considérons Lightweight OpenPose [19], dont l'architecture se compose de trois composants principaux : un extracteur de caractéristiques, un estimateur TS et un réseau Part Affinity Fields (PAF).

Par rapport à l'OpenPose original [20], nous avons choisi Lightweight OpenPose car la forte demande de calcul de la première méthode la rend moins applicable dans les applications en temps réel sur des appareils avec peu de puissance de traitement. OpenPose utilise une architecture CNN à deux branches et à plusieurs étages. La première branche prédit les cartes de confiance des parties (PCM) pour les parties du corps, et la deuxième branche prédit les champs d'affinité des parties (PAF) pour modéliser les connexions entre les parties du corps. L'architecture implique plusieurs étapes de convolutions pour affiner ces prédictions de manière itérative, ce qui permet d'obtenir une grande précision au prix d'une charge de calcul accrue. Light OpenPose, quant à lui, modifie l'architecture d'origine pour réduire la complexité et améliorer l'efficacité. L'approche réduit le nombre de couches et d'étapes convolutives et utilise des convolutions séparables en profondeur à la place des convolutions standard pour réduire le nombre de paramètres et d'opérations. De plus, le réseau fédérateur utilise MobileNet ou ShuffleNet à la place du VGG19 ou ResNet plus lourd utilisé dans l' OpenPose d'origine et optimise le calcul des champs d'affinité des pièces pour trouver un équilibre entre précision et efficacité.

Extraction de caractéristiques. Le Lightweight OpenPose original utilise un réseau MobileNetV1 optimisé pour atteindre l'extraction de fonctionnalités en temps réel. MobileNet est une famille d' architectures de réseaux neuronaux conçues pour un déploiement efficace sur des appareils mobiles et embarqués dotés de ressources informatiques limitées. La principale caractéristique de MobileNet est son utilisation de convolutions séparables en profondeur, qui peuvent réduire considérablement le nombre de paramètres et de calculs requis tout en conservant une grande précision.

Bien que MobileNetV1 soit un réseau neuronal très efficace, il présente certaines limites et inconvénients dont il convient de tenir compte. Par exemple, sa précision est limitée car elle est conçue pour équilibrer la taille et la précision du modèle. Il se peut qu'il n'atteigne pas le même niveau de précision que les réseaux neuronaux plus grands et plus complexes, en particulier sur des objets difficiles où les points clés (articulations) ne sont pas évidents. L'opération de convolution séparable en profondeur utilisée dans MobileNetV1 peut être moins expressive que les opérations de convolution traditionnelles et peut ne pas être en mesure de capturer toutes les caractéristiques importantes d'une image.

Pour les raisons ci-dessus, dans ce travail, nous proposons de remplacer MobileNetV1 par MobileNetV3 [21] pour l'étape d'extraction des fonctionnalités. MobileNetV3 a été conçu pour répondre aux limites de MobileNetV1 tout en conservant son efficacité. L'architecture du réseau MobileNetV3 utilisé dans ce travail est illustrée à la figure 3.

MobileNet V3 a deux variantes principales : (1) MobileNet V3-Large conçu pour les applications de plus haute précision, avec plus de couches et de canaux, et (2) MobileNet V3-Small optimisé pour les environnements aux ressources limitées, troquant une certaine précision pour un calcul réduit. - la demande nationale. Notre choix s'est porté sur cette dernière. MobileNet V3 introduit plusieurs nouveaux composants, tels que les blocs résiduels inversés pour maintenir un haut degré d'efficacité, les modules de compression et d'excitation (SE) pour améliorer la puissance de représentation du modèle en recalibrant les réponses des fonctionnalités par canal et l'activation H-Swish. Fonction.

La fonction hard-swish est une fonction d'activation non linéaire conçue pour être plus efficace que les fonctions d'activation traditionnelles telles que ReLU. La fonction hard-swish est définie comme

$$\text{swish}(x) = x\,6 \qquad \frac{\text{ReLU6}(x+3)\ \text{h-}}{\qquad}\ , \tag{1}$$

où ReLU6(x) = min(max(x, 0), 6) est une fonction ReLU écrêtée qui génère des valeurs comprises entre 0 et 6, offrant toujours un comportement non linéaire tout en augmentant la vitesse de calcul par rapport à la fonction ReLU standard .

Une autre caractéristique importante de MobileNetV3 est l'utilisation d'un module de compression et d'excitation (SE) . Le module SE est un moyen simple et efficace d'améliorer le pouvoir de représentation

Machine Translated by Google

du réseau (c'est-à-dire la capacité d'apprendre et de représenter des modèles et des caractéristiques complexes dans le des données d'entrée). Il fonctionne en apprenant les facteurs de mise à l'échelle par canal qui sont utilisés pour sélectionner sélectivement améliorer les fonctionnalités informatives du réseau. Le module SE est ajouté à chaque goulot d'étranglement bloc dans l'architecture MobileNetV3, contribuant à augmenter la précision en ce qui concerne à MobileNetV1.

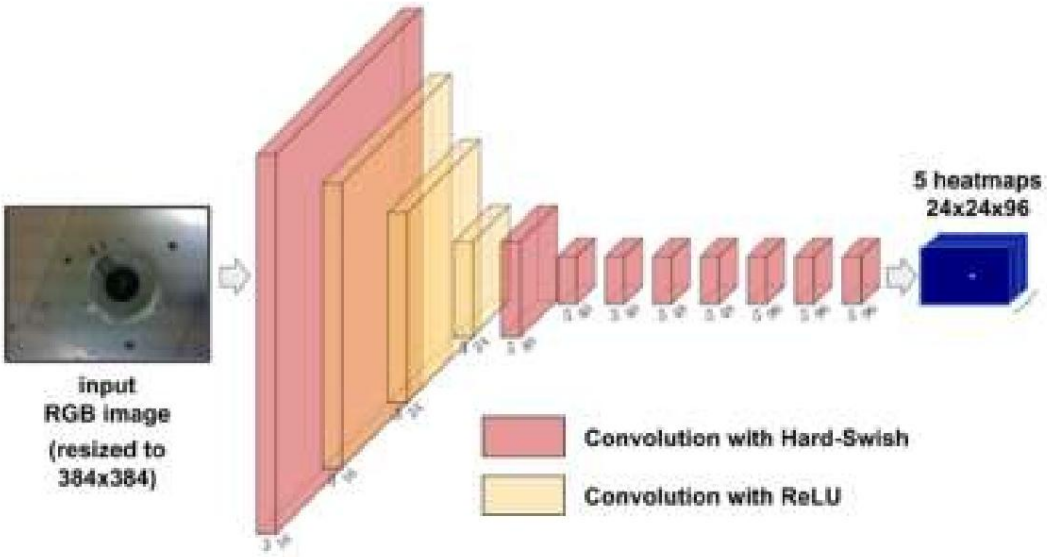


Figure 3. Architecture MobileNetV3.

MobileNetV3 introduit également une nouvelle technique appelée goulot d'étranglement inversé mobile. convolution (MBConv), qui est une forme modifiée de la convolution séparable en profondeur utilisé dans MobileNetV1. Le bloc MBConv se compose de trois types de convolutions : un 1 × 1 convolution pour augmenter le nombre de canaux, une convolution en profondeur pour effectuer des filtrage et une convolution 1 × 1 pour réduire le nombre de canaux à la taille d'origine. Le bloc MBConv comprend également une connexion raccourci qui permet au dégradé de circuler directement de l'entrée à la sortie. Le bloc MBConv aide à augmenter l'expressivité du modèle par rapport à MobileNetV1.

Enfin, MobileNetV3 comprend un bloc de flux intermédiaire utilisé pour maintenir un niveau élevé niveau de précision tout en minimisant le nombre de calculs requis. Il utilise également un opération de convolution dynamique qui s'adapte aux données d'entrée. Le détail des paramètres utilisés pour chaque bloc sont décrits dans le tableau 2. L'image d'entrée est redimensionnée à 384 × 384, et le résultat est un ensemble de cartes de fonctionnalités 24 × 24 × 96, une pour chaque point clé et une pour l'arrière-plan.

Tableau 2. L'architecture réseau MobileNetV3 utilisée dans cet article. HS = coup dur, RE = ReLU, s = foulée.

Entrée	Opérateur	Taille d'expérience	#dehors	SE	T.-N.-L.	s
3842 × 3	conv2d, 3 × 3	1922 × 16	-	16	-	SH	2
bneck, 3 × 3	962 × 16	bneck, 3 × 3	16	16	x	CONCERNANT	2
482 × 24	bneck, 3 × 3	482 × 24	72	24	-	CONCERNANT	2
bneck, 5 × 5	242 × 40	bneck, 5 × 5	88	24	-	CONCERNANT	1
242 × 40	bcou, 5 × 5	242 × 40	96	40	x	SH	2
bcou, 5 × 5	242 × 48	bcou, 5 × 5	240	40	x	SH	1
242 × 48	bcou, 5 × 5	242 × 96	240	40	x	SH	1
bcou, 5 × 5	242 × 96	bcou, 5 × 5	120	48	x	SH	1
			144	48	x	SH	1
			288	96	x	SH	1
			576	96	x	SH	1
			576	96	x	SH	1

Machine Translated by Google

Estimation TS. Les cartes de caractéristiques de MobileNetV3 constituent l'entrée permettant de générer un ensemble de points clés candidats pour chaque partie d'objet de l'image. En fait, les cartes de caractéristiques capturent les informations spatiales dans l'image d'entrée et fournissent une représentation riche de l'image qui peut être utilisée pour détecter des points clés. MobileNetV3 ajoute une tête personnalisée pour prédire les emplacements des points clés, qui consiste en une série de couches convolutives qui génèrent des cartes thermiques, affinant les fonctionnalités extraites par le backbone et générant des cartes thermiques pour chaque point clé. La figure 4 montre un exemple de sortie de l'estimateur TS pour le couvercle du séparateur d'huile de carter en fonte , qui se compose de cinq cartes thermiques, une pour chaque point c Chaque carte thermique a la même résolution spatiale que les cartes de caractéristiques et est normalisée pour avoir des valeurs comprises entre 0 et 1. Chaque pixel de la carte thermique indique la probabilité que la partie du corps correspondante soit présente à cet emplacement dans l'image.

Réseau PAF. Il prend les cartes de fonctionnalités générées par l'extracteur de fonctionnalités en entrée et génère un ensemble de cartes de fonctionnalités PAF, une pour chaque paire de points clés détectés. Les cartes de fonctionnalités PAF codent la direction et la force des connexions entre les points clés à l'aide d'une représentation à deux canaux, où chaque canal code un aspect différent de la connexion. Plus précisément, un canal code le vecteur unitaire qui représente la direction de la connexion, tandis que l'autre canal code le score de confiance qui représente la force de la connexion.

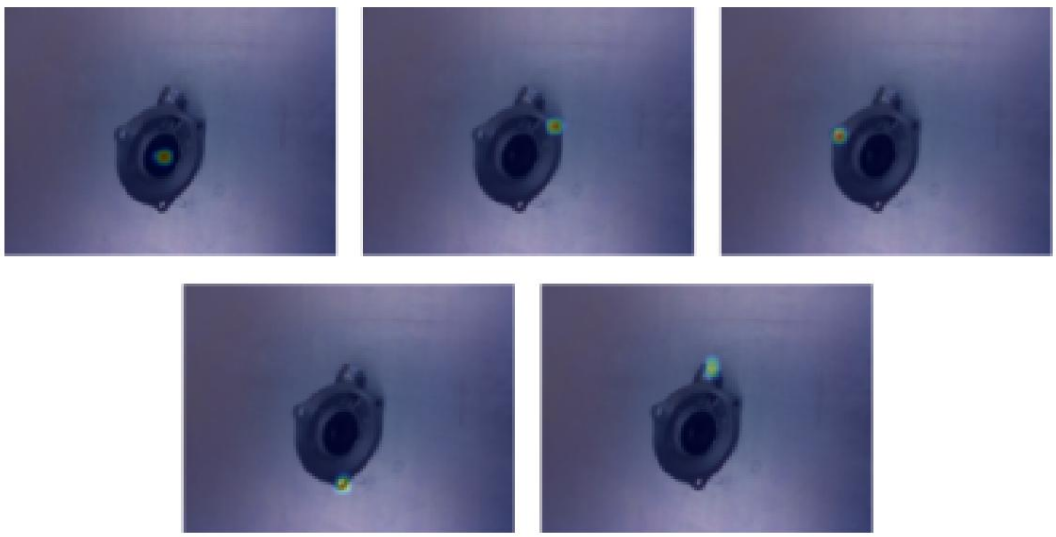


Figure 4. Exemples de cartes thermiques pour le couvercle du séparateur d'huile de carter en fonte. Il existe cinq cartes thermiques correspondant aux points clés considérés.

Calcul final du TS. Une fois le PAF et les cartes thermiques générés, ils sont utilisés ensemble pour regrouper les points clés individuels dans le TS final. Le TS final est obtenu en identifiant d'abord les connexions candidates à l'aide des PAF, puis en notant les connexions en fonction de la probabilité qu'elles forment une connexion valide. Les connexions sont ensuite utilisées pour construire le TS final en connectant les points clés individuels en un objet TS complet.

Une fois les points clés calculés, nous utilisons les informations de profondeur pour construire le TS 3D final en fonction de l'ensemble des points clés de Lightweight OpenPose. La figure 5 montre quelques exemples de TS finaux pour les trois objets considérés, où il est possible de noter la robustesse de l'approche d'extraction de TS proposée par rapport à différentes vues de l' objet, aux changements photochromiques et aux occlusions partielles. L'approche fonctionne également avec plusieurs instances de l'objet.

Machine Translated by Google

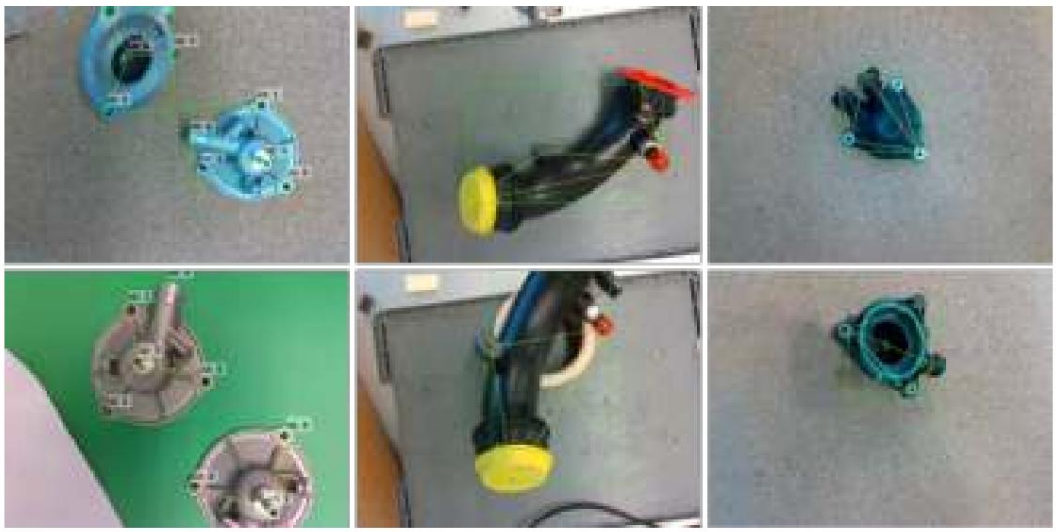


Figure 5. Exemples d'extraction TS sur différents objets : le couvercle séparateur d'huile de carter en fonte à gauche, le tuyau d'air au milieu et le couvercle séparateur d'huile de carter en plastique à droite. Notre approche est robuste aux différentes vues du même objet, aux changements photochromiques et aux occultations partielles.

3.3. Sélection de la pose de

préhension Après la sélection des Nk points clés pour l'extraction TS, ces points clés sont également identifiés dans le modèle CAO de l'objet via un logiciel de modélisation 3D. Cela aboutit à la génération d'une représentation tridimensionnelle nominale du TS, TSN, dans le système de coordonnées CAO, Ff . De plus, les poses dans Ff de tous les référentiels de saisie Ng possibles (voir Figure 6), exprimés via la matrice de transformation homogène (4 × 4) [22], f T

gj , j = 1, . . . , Ng, peut être localisé sur le modèle. Par souci de clarté, supposons que chaque point de saisie coïncide avec un point clé.



Figure 6. Les cadres de préhension pour les objets considérés : couvercle du séparateur d'huile de carter en fonte (rangée supérieure), couvercle du séparateur d'huile de carter en plastique (rangée du milieu) et tuyau d'air (rangée du bas).

Machine Translated by Google

Ensuite, étant donné toutes les combinaisons possibles de trois points clés

$$St = ti , je = 1, \ldots , Nt = \binom{Nk}{3} : ti = (Pj , Pl , Pm), j, l, m \quad \{1, \ldots , Nk\}, j \quad = l \quad = m \quad ,$$

pour chaque triple ti , un plan est identifié via un repère de coordonnées qui lui est attaché, dont la pose f est notée par la matrice de transformation homogène T ti . Pour chaque référentiel de préhension , la pose relative par rapport au ième plan peut être déterminée comme

$$T^{ti} = T\,gj\,ti^{f} \quad {}^{-1}{}_{f}T_{gj}. \tag{2}$$

Ainsi, pour chaque point de préhension, une liste de Nt matrices de transformation, $T\,gj^{ti}$, représentant les poses du cadre de préhension dans le repère plan, peut être calculée. Cet ensemble d'opérations, résumées dans l'algorithme 1, n'est effectué qu'une seule fois.

Algorithme 1 : Algorithme de prétraitement

Entrée : TSN, Ng, Nt , T^{F}_{gj} (j = 1, . . . , Ng)

Sortie : T^{ti}_{gj} (i = 1, . . . , Nt ; j = 1, . . . , Ng) 1 pour chaque triple ti de points clés dans TSN do f 2 Calculer T ti 3 fin pour 4 pour i = 1, . . . , Nt à faire pour j = 1, . . . , Ng do −1 ff ti T

= TT gj ti gj

5

6

7 fin pour

8 fin pour

9 retour $T\,gj^{ti}$

Au moment de l'exécution, les étapes suivantes sont exécutées :

1. Un détecteur YOLO [23] est adopté pour distinguer les objets. YOLO a été choisi car il est plus rapide que les systèmes basés sur des classificateurs mais avec une précision similaire et fait des prédictions avec une seule évaluation de réseau en considérant la détection d'objets comme un problème de régression unique, ce qui conduit à des performances de haute précision. De plus, YOLO peut détecter et classer plusieurs objets simultanément au sein d'une image.
2. Le TS 3D actuel, TSC, est extrait.
3. Le point de préhension le plus proche de la caméra, p 4a. Si au $^{c}_{cc,}$ est sélectionné comme le meilleur. moins 3 points clés sont visibles, un ensemble de trois points clés, tk , le plan correspondant est utilisé pour calculer et dans le repère de la caméra, T tk matrice de transformation, T la $^{c}_{merci\,.}$ sélectionner l'homogène procédure se poursuit avec l'étape$_{gcc}$, qui identifie la pose de préhension dans le cadre plan. Alors, 5.4b . Si seulement 2 points clés ou moins sont visibles, le robot commence à se déplacer en cercle autour du centre du cadre de délimitation de l'objet pour acquérir une nouvelle image d'un point de vue différent. Ensuite, la procédure revient à l'étape 1.
5. La pose de préhension dans le cadre de la caméra est calculée comme suit :

$$^{c}_{Tgcc} \quad tk = TT^{c}_{tk}{}_{gcc}.$$

Cette procédure est résumée dans l'algorithme 2.

Définissons la matrice de transformation homogène $T\,^{e}_{c}$, c'est-à-dire la matrice homogène constante effectuant la transformation entre le cadre de la caméra et le cadre de l'effecteur final , obtenue via la méthode de calibrage décrite dans la section 3.1.

Machine Translated by Google

Algorithme 2 : algorithme d'exécution objT

Entrée : pour chaque objet gj T_{gcc}^{ti}

Sortie : T_{gcc}^{c}

1 Récupérer l'image de la caméra 2

Détecter l'objet courant à partir de l'image 3 TSC

← extraire TS ti 4 T = T ←

récupérer la liste des transformations relatives au gj courant i=1,...,Nt ; j=1,...,Ng objet ← extraire le point de préhension le plus proche

de la

5 p $_{cc}^{c}$ caméra

6 si visible_keypoints ≥ 3 alors tk ←

7 | extraire un triple de points clés visibles dans TSC

8 Calculer T tk à partir ^{c}

9 | Extraire T gcc ^{merci} de T

10 sinon

11 déplacez le robot vers un point de vue différent

12 ALLER À 1

13 fin si

14 T_{gcc}^{c} merci ← $T_{Merci\ gcc}^{c}$

15 retour T_{gcc}^{c}

Pour capturer la pose de préhension dans le référentiel inertiel, T_{gcc}^{c} se transforme comme suit

$$Tgcc = TeT \; {}_{c}^{e} \; Tgcc^{c}, \tag{3}$$

où Te est la matrice homogène représentant la pose de l'effecteur terminal dans le référentiel inertiel.

Remarque 1. Il est à noter que si le point de saisie ne coïncide pas avec un point clé, la procédure ci-dessus est toujours applicable, mais une autre transformation constante doit être appliquée pour relier le point de saisie à l'un des points clés appartenant au plan.

3.4. Préhension du

robot Pour effectuer la préhension, l'effecteur final doit recevoir l'ordre d'aligner son cadre de référence sur le cadre de référence de préhension. La trajectoire est planifiée en attribuant une séquence de trois points : le premier est la pose de vue du robot, le intermédiaire est le point d'approche , c'est à dire un point positionné le long de l' axe z du repère de préhension à une distance de 10 cm à l'origine, et le dernier est la position de préhension estimée, pˆ la position souhaitée de l'effecteur terminal, pe,d (t), est définie comme $_{g}$. Plus en détail,

$$pe,d\,(t) = \begin{cases} (pa - p0)\,\dfrac{s1(t)}{pa - p0} \text{ pour } 0 \le t \le ta \\ p0 + \dfrac{s2(t)}{p\hat{} - pa_{g}}\,(p\hat{} - pa_{g}) \text{ pour } ta < t \le tf \end{cases}. \tag{4}$$

où p0 est la position de vue et pa est la position du point d'approche, s1(t) (s2(t)) est la longueur de l'arc de p0 à pa (de pa à pˆ points de chemin, à la fois pour s1(t) et s2(t), la loi du temps peut être conçue $_{g}$). Pour assurer une accélération et des vitesses continues au comme un polynôme quintique.

Concernant les instants de temps, tf est la durée du mouvement, et ta est l'instant de temps intermédiaire au point d'approche que l'on choisit pour avoir un mouvement rapide jusqu'au point d'approche et un mouvement lent à proximité de l'objet.

Machine Translated by Google

Concernant l'orientation de l'effecteur terminal, il est prévu d'atteindre la même orientation de la pose de préhension estimée, Rg, au point d'approche et de maintenir cette orientation constante pendant la dernière partie du trajet.

La trajectoire prévue en termes de position et d'orientation est l'entrée de l' algorithme de cinématique inverse en boucle fermée [22] visant à calculer les valeurs de référence des positions et des vitesses des articulations. Notons par pe (t) et Re(t) la position et l'orientation de l'effecteur terminal , respectivement, et par Re,d (t) l'orientation souhaitée de l'effecteur terminal. Les références de vitesse articulaire du robot, ˙qr (t), sont calculées comme suit :

$$\dot{q}_r(t) = J^{\dagger}(q(t))(v_{e,d}(t) + Ke(t)), \quad (5)$$

où $J^{\dagger}(q(t))$ désigne le pseudo-inverse droit de la matrice jacobienne du robot, $K \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ est un gain matriciel défini positif, $v_{e,d} = p_{e,d}^{T}\ \omega_{e,d}^{T}$ est l'effecteur final souhaité linéaire et angulaire, et e est l'erreur de poursuite définie comme

$$e = \begin{matrix} p_{e,d} - p_e \\ \eta_e\ _{e,d} - \eta_{e,d}\ _e - S(\ _{e,d})\ _e \end{matrix}, \quad (6)$$

où $Q_e = \{\eta_e, \epsilon_e\}$ et $Q_{e,d} = \{\eta_{e,d}, \epsilon_{e,d}\}$ sont le quaternion unitaire extrait de Re et Re,d , respectivement, et S(·) est l'opérateur matriciel antisymétrique effectuant le produit vectoriel [22].

Une représentation organigramme mettant en évidence l'ensemble du processus est donnée à la figure 7.

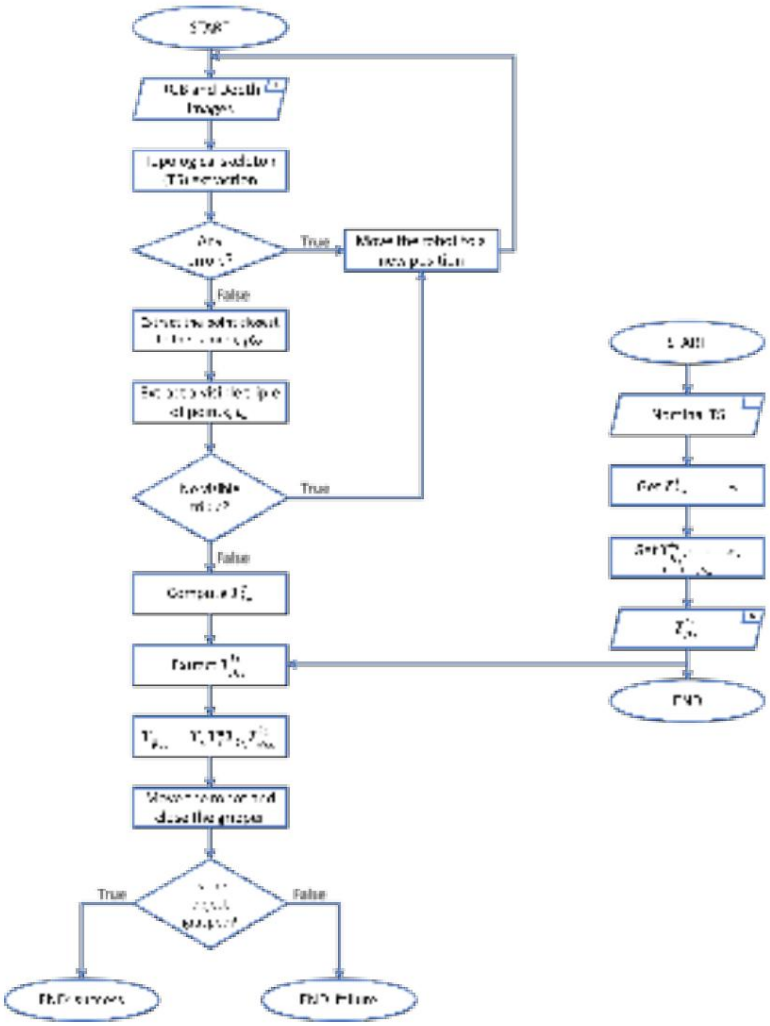


Figure 7. Représentation organigramme de l'ensemble du processus.

Machine Translated by Google

4. Résultats expérimentaux

La configuration expérimentale consiste en une caméra Intel RealSense D435 montée sur un Robot manipulateur Franka Emika Panda, caractérisé par 7 articulations révolutionnaires. Le robot peut être contrôlé au moyen de la Franka Control Interface (FCI) et de la libfranka C++ bibliothèque open source, qui contrôle directement le robot avec un poste de travail externe via une connexion Ethernet. Dans ce travail, le méta-paquet franka_ros , qui intègre libfranka dans ROS, a été utilisé. Le poste de travail exécute Ubuntu 18.04 LTS et un temps réel noyau sur un processeur Intel Xeon 3,7 GHz avec 32 Go de RAM. Nous avons mené des expériences avec les trois objets considérés montrés dans la figure 6, et les résultats quantitatifs sont rapporté ci-dessous.

4.1. Résultats de l'extraction TS

Grâce à Coco Annotator [24], 5992 images ont été annotées. Les données étiquetées ont été divisé en ensembles de formation, de validation et de test composés de 4618, 229 et 1145 images, respectivement. Le tableau 3 montre le nombre d'images dans les ensembles de formation, de validation et de test. pour chaque objet considéré.

Tableau 3. Nombre d'exemples d'images utilisés dans les ensembles de formation, de validation et de test pour les objets considérés.

Objet	Entraînement	Validation	Test
Couvercle de séparateur d'huile de carter en fonte	1440	60	300
Tuyau d'air	1406	46	228
Couvercle de séparateur d'huile de carter en plastique	1772	123	617

La métrique que nous avons utilisée pour évaluer la détection TS est la similarité des points clés d'objet. (OKS) [25], défini comme suit :

$$OK = \frac{\sum i \quad [0,N-1] \exp \quad \frac{-d^{2}}{2s\ 2k\ 2} \quad \delta(vi > 0)}{\sum i \quad [0,N-1] \ \delta(vi > 0)} \tag{7}$$

où:

- s est l'échelle de l'objet ;
- di est la distance du point clé prédit i à la vérité terrain ;
- ki est une constante par point clé qui contrôle l'atténuation ;
- vi est le drapeau de visibilité.

OKS est calculé pour chaque échantillon représentant un objet. Le drapeau de visibilité prend en compte si un point est visible ou non : si le point clé est étiqueté, δ(vi > 0) vaut 1, sinon il vaut 0 sans tenir compte des points clés masqués.

Dans notre scénario, nous avons utilisé OKS pour calculer le vrai positif (TP), le faux négatif (FN), Détections de faux positifs (FP) et de vrais négatifs (TN). Si une détection a OKS > seuil, il est considéré comme un TP ; sinon, en tant que FP. En particulier, nous avons considéré deux seuils, à savoir 0,5 et 0,75, et calculé les métriques suivantes : précision, rappel, score F1, et précision moyenne (AP). Le tableau 4 montre les résultats de notre algorithme pour un ensemble de tests de 1145 images.

Tableau 4. Résultats du détecteur TS à différents seuils pour un ensemble de tests de 1 145 images.

Seuil	Précision	Rappel	Score F1	PA
0,5	0,92	0,90	0,91	0,82
0,75	0,86	0,89	0,87	0,72

Pour calculer les performances d'exécution de notre extracteur TS, nous l'avons testé sur un sous-ensemble de 60 images utilisant une NVIDIA RTX A5500, obtenant un temps d'exécution moyen de 0,012 s et

Machine Translated by Google

un écart type de 0,0018 s. Sur un sous-ensemble de 40 images, utilisant un NVIDIA QUADRO T2000, le temps d'exécution moyen est de 0,019 s et l'écart type est de 0,0025 s.

4.2. Résultats du détecteur

d'objets Pour entraîner le détecteur d'objets, nous avons annoté 750 images de taille 640 × 480 à l'aide de l' outil d'annotation LabelImg [26]. Nous divisons l'ensemble de données en ensembles Train, Validation et Test composés respectivement de 450, 150 et 150 images. Après la phase de formation, la précision moyenne sur l'ensemble de tests est de 97,32 % et le taux de réussite est de 96,70 %. L'inférence sur les images a été exécutée sur un NVIDIA QUADRO T2000. Sur un sous-ensemble de 40 images, le temps d'exécution moyen est de 0,323 s, tandis que l'écart type est de 0,0615 s.

4.3. Robot saisissant les résultats

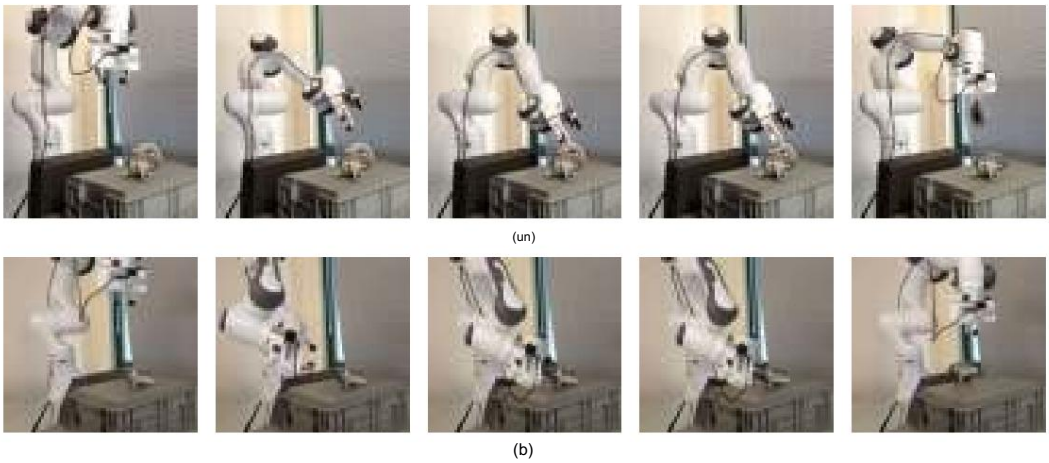
Définissons les erreurs d'estimation de la position de saisie et d'orientation comme

$$e_{ep} = pg^{e} - p\hat{}g^{e}, \quad (8)$$

$$e_{e\varphi} = g^{e} - \hat{}g^{e}, \quad (9)$$

où p^{e}_{g} est la position de préhension réelle tandis que $p\hat{}^{e}_{g}$ est l'estimation fournie par le visuel algorithme. Concernant l'orientation, $e_{g}(\hat{}^{e}_{g})$ sont les angles d'Euler extraits du réel (estimée) pose de préhension. L'adoption des angles d'Euler au lieu des quaternions comme dans (6) fournit une interprétation physique plus claire des erreurs d'orientation. L'exposant e indique que les variables sont exprimées dans le cadre de l'effecteur final (voir Figure 2).

Pour avoir des résultats statistiquement significatifs, 54 tests de préhension (20 pour le couvercle séparateur d'huile de carter en fonte , 19 pour le tuyau d'air et 15 pour le couvercle séparateur d'huile de carter en plastique) ont été réalisés en plaçant les objets dans différentes configurations, différentes conditions d'éclairage. , et avec des arrière-plans différents de manière à laisser le robot explorer toutes les poses de préhension possibles. Un test de préhension est considéré comme réussi si la pince maintient l'objet avec une préhension stable pendant 10 s. Un ensemble d'instantanés de la procédure de préhension est présenté à la figure 8, où la rangée du haut fait référence à un test réussi et la rangée du bas à un échec.



(un)

(b)

Figure 8. Instantanés de deux cas de préhension. (a) Maîtrise réussie. (b) Échec.

Seules 7 expériences (2 pour le couvercle du séparateur d'huile du carter en fonte, 3 pour le tuyau d'air et 2 pour le couvercle du séparateur d'huile du carter en plastique) ont connu un échec. Ainsi, un taux de réussite de 87,04% a été obtenu. Les tableaux 5 à 7 montrent les erreurs moyennes de position et d'orientation et l'écart type correspondant pour les tests réussis.

Machine Translated by Google

Tableau 5. Erreurs moyennes pour le couvercle du séparateur d'huile du carter en fonte.

Tests réussis	e_{px}^{e} [mm] e	e_{py}^{e} [mm] e	e^{e}_{x} [degrés]	e^{e}_{y} [degrés]
1	0,734	9.471	3.128	3.515
2	6.867	0,717	3.284	3.091
3	1.081	5.857	6.092	12.433
4	13.032	10.752	3.132	6.256
5	1.796	0,775	6.801	0,77
6	3.832	0,759	3.913	3.546
7	3.629	1.531	2.981	3.416
8	1.324	6.747	0,674	0,92
9	3.073	7.437	0,62	35.308
dix	1.293	1.021	0,952	1.605
11	3.916	1.631	0,391	6.217
12	4,62	2.697	3.044	4.508
13	2.368	4.09	9.12	3.953
14	0,463	6.314	2.456	10.075
15	1.816	2,214	2,217	5.806
16	2,958	4,751	1,842	7.763
17	2,86	8,736	1,354	4.138
18	3,018	0,747	13,855	2.16
Signifier	3,26	4,236	3,659	6.415
Écart-type	2,820	3,278	3,329	7.607

Tableau 6. Erreurs moyennes pour la conduite d'air.

Tests réussis	e_{px}^{e} [mm]	e_{py}^{e} [mm]	e^{e}_{x} [degrés]	e^{e}_{y} [degrés]
1	0,043	0,989	2,439	8.109
2	9,586	17,223	4,597	0,555
3	1,098	2,612	16,723	13.204
4	3,777	6,188	19,545	10.702
5	7,213	0,227	3,663	1.042
6	3,882	1,516	1,684	0,315
7	2,897	2,176	11,183	1.733
8	0,144	1.932	10.255	7.891
9	2.41	1.412	12.057	7.392
dix	5.042	0,797	12.674	20.755
11	2.989	2.809	11.516	26.216
12	14.5	4.903	0,988	2.294
13	11.149	1.207	5.192	0,53
14	3.736	5.841	9.211	25.563
15	0,818	8.494	12.022	20.307
16	0,636	14.538	15.122	7.086
Signifier	4.37	4.554	9.304	9.606
Écart-type	4.085	4.843	5.447	8.801

Pour tous les objets, les erreurs de position le long de l' axe z du cadre effecteur final ont n'ont pas été signalés car ils sont négligeables en raison de la géométrie de l'objet. Pour la même raison, les erreurs d'orientation autour de l' axe z du cadre de l'effecteur final peuvent être négligeables pour le le couvercle du séparateur d'huile du carter en fonte et le tuyau d'air.

Dans certains tests, des erreurs importantes ont été constatées, principalement le long de l' axe y du cadre de l'effecteur final, mais l'objet a été saisi avec succès puisque la pince est caractérisée par des doigts parallèles, et les erreurs dans le sens de fermeture sont plus tolérées.

Les pannes du système peuvent être divisées en deux catégories principales :

1. Erreurs liées à un point clé manquant (voir Figure 9a, e) ou inexact (voir Figure 9b, d, f) détection ou prédiction et mauvaise estimation de la profondeur.
2. Pose des erreurs d'estimation pouvant provoquer le glissement de l'objet.

Machine Translated by Google

Tableau 7. Erreurs moyennes pour le couvercle du séparateur d'huile du carter en plastique.

Tests réussis	e_{px} [mm] e	e_{py} [mm] e	e_{x} [degrés]	e_{y} [degré] e	e_{z} [degrés]
1	13.453	1.036	7.726	4.594	10.505
2	1.795	8.396	11.419	16.797	1.977
3	1.387	5.306	2.214	3.451	11.761
4	7.493	5.909	3.41	5.945	7.285
5	0,799	6.753	3.439	12.744	2,62
6	2.997	1.521	2.03	4.885	9.134
7	5.897	9.452	10.56	1.247	4,62
8	0,973	1.319	7.221	0,007	4.146
9	2.246	5.577	2.104	3.025	2.231
dix	1.268	13.631	3.325	4.165	26.108
11	4.547	13.786	2,265	1.418	7.61
12	0,575	1.472	8.638	2.531	10.629
13	3.606	2.318	1.721	6.289	23.799
Signifier	3.618	5.883	5.082	5.161	9.417
Écart-type	3.487	4.281	3.381	4.527	7.367

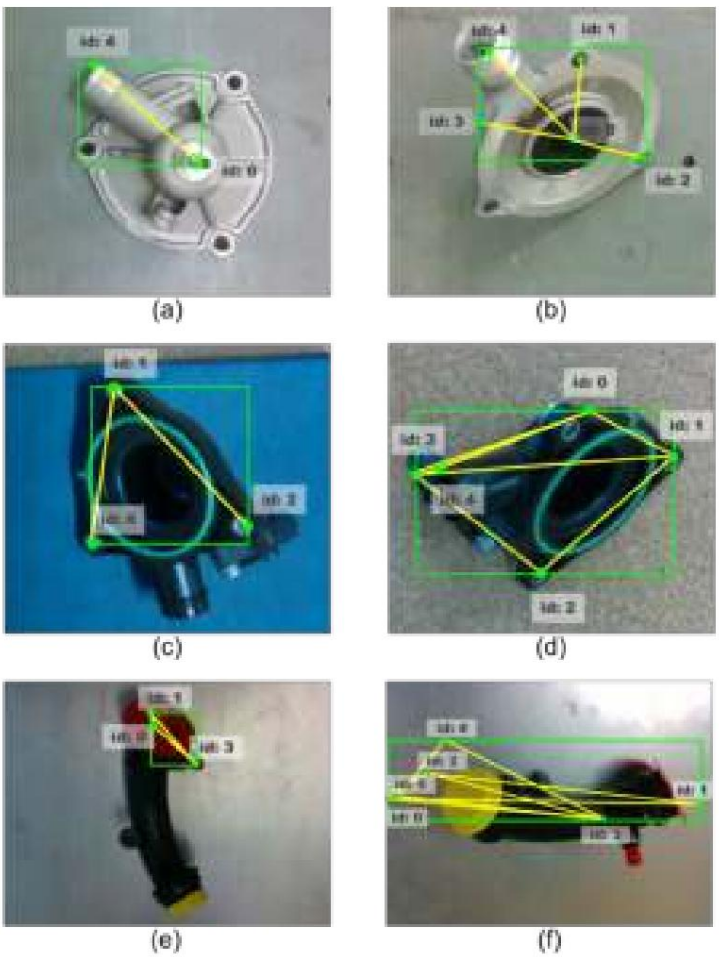


Figure 9. Exemples de détection de points clés manquants (a,e) et inexacts (b,d,f) dans TS. Exemple de détection de points clés manquants pouvant conduire à une saisie réussie d'un objet (c).

Dans le cas d'une détection de point clé manquant, par exemple en raison de l'objet-caméra relatif position, la panne peut être gérée en déplaçant le point de vue de la caméra et en acquérant un nouvelle prédiction (voir section 3.3). Dans les autres cas, la procédure de préhension est terminée avec un échec. Puisque le robot peut détecter l'échec de préhension, l'ensemble du processus est répété.

Machine Translated by Google

Il convient de noter que, selon la procédure décrite dans l'algorithme 2, la saisie d'un objet est réalisable même avec seulement trois points clés visibles (voir Figure 9c) correctement détectés, à condition que l'un d'eux soit un point de préhension situé dans un endroit qui peut être saisi avec l'effecteur final disponible.

5. Conclusions

Dans ce travail, une méthode robuste pour la saisie de pièces à géométrie complexe dans un scénario industriel a été proposée. Dans un tel environnement, les difficultés de préhension sont dues à la présence d'incertitudes sur la position de l'objet à saisir et à la perception du bruit dû à son matériau. En particulier, nous nous sommes concentrés sur des pièces automobiles réelles présentant des géométries complexes et des surfaces réfléchissantes qui provoquent du bruit dans la carte de profondeur. La solution proposée s'appuie sur un réseau d'extraction TS capable de créer une représentation graphique de l'objet en temps réel. Une étape de raisonnement permet de décider si la vue actuelle de l'objet est suffisamment bonne pour la saisie réelle ou si le manipulateur doit bouger pour mieux saisir l'objet. Des expériences quantitatives ont été menées avec un robot 7 DoF et trois pièces automobiles de formes complexes différentes, démontrant que l'approche proposée est rapide et robuste. La haute précision et la capacité en temps réel de cette approche proposée en font une solution adaptée aux applications industrielles où des performances rapides et précises sont requises.

En raison de la complexité des objets considérés, une comparaison quantitative complète des performances avec d'autres approches présentes dans la littérature peut difficilement être réalisée. Cependant, l'ensemble de données de test est accessible au public pour permettre de futures comparaisons.

Dans les orientations futures, nous avons l'intention d'étudier l'intégration des données de profondeur dans le processus d'extraction TS pour obtenir directement les positions 3D des points clés. De plus, la phase de détection d'objets pourrait également être intégrée à la procédure d'extraction TS.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, AP, MS, DDB et FP ; Méthodologie, AP, MS, DDB et FP ; Logiciels, AP, MS et DDB ; Enquête, AP et MS ; Validation, AP et MS ; Analyse formelle, AP, MS et DDB ; Rédaction : brouillon original, AP et MS ; Rédaction – révision et édition, DDB et FP ; Supervision, DDB et FP ; Administration de projet, DDB et FP ; Financement d'acquisition, FP Tous les auteurs ont contribué à parts égales à ce travail. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été soutenue par le ministère italien de l'Université et de la Recherche dans le cadre de la subvention PRIN 2022 PNRR MELODY (Manipulation collaborative multi-robot supportant les tâches de démontage) n. P2022XALNS.

Déclaration de disponibilité des données : le code source de l'approche du détecteur TS est accessible au public sur https://github.com/apennisi/CoGP-TS. Le code source basé sur ROS de notre approche est disponible publiquement sur https://github.com/sileom/graspingWithSkeleton.git. Plusieurs vidéos des expériences sont disponibles sur https://tinyurl.com/bdhyf493. Les images de l'ensemble de test sont disponibles sur https://tinyurl. com/bdxs8n7z. Tous les modèles utilisés dans la stratégie décrite sont accessibles au public et peuvent être téléchargés depuis https://tinyurl.com/3a4nnc88 (Tous les liens consultés le 23 juillet 2024).

Remerciements : Les auteurs souhaitent remercier Alessandro Lorenzo, Simona D'Amato et Antonio Giardiello pour leur aide dans le processus d'annotation des images.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce manuscrit :

CNN	Réseau neuronal convolutif
DoF	Degré de liberté
FCI	Interface de contrôle Franka
FCN	Réseau entièrement convolutif
FR	Faux négatif

Machine Translated by Google

FP	Faux positif
Réseau neuronal convolutif à saisie générative GG-CNN	
Convolution inversée du goulot d'étranglement MBConv Mobile	
OK	Similitude des points clés des objets
FAP	Champs d'affinité de pièce
ROS	Système d'exploitation du robot
TN	Vrai négatif
TP	Vrai positif
TS	Squelette topologique

Les références

1. Siléo, M. ; Bloisi, DD; Pierri, F. Détection et saisie d'objets en temps réel à l'aide de la soustraction d'arrière-plan dans un scénario industriel. Dans les actes du 6e Forum international de l'IEEE 2021 sur la recherche et la technologie pour la société et l'industrie (RTSI), virtuel, 6-9 septembre 2021 ; pp. 283-288.
2. Siléo, M. ; Bloisi, DD; Pierri, F. Saisie d'objets industriels solides à l'aide de l'enregistrement 3D. Machines 2023, 11, 396. [CrossRef]
3. Costanzo, M. ; De Maria, G. ; Lettera, G. ; Natale, C. Les robots peuvent-ils remplir une étagère de supermarché ? : Planification des mouvements et contrôle de la saisie. Robot IEEE. Automatique. Mag. 2021, 28, 61-73. [Référence croisée]
4. Asif, U. ; Tang, J. ; Harrer, S. GraspNet : un réseau neuronal convolutif efficace pour la détection de saisie en temps réel pour les appareils de faible consommation . Dans Actes de l'IJCAI, Stockholm, Suède, 13-19 juillet 2018 ; pages 4875 à 4882.
5. Zhang, H. ; Tan, J. ; Zhao, C. ; Liang, Z. ; Liu, L. ; Zhong, H. ; Fan, S. Une méthode de détection et de préhension rapide pour le manipulateur mobile basé sur un R-CNN amélioré et plus rapide. Robot indien. Int. J.Robot. Rés. Appl. 2020, 47, 167-175. [Référence croisée]
6. Mahler, J. ; Liang, J. ; Niyaz, S. ; Laskey, M. ; Doan, R. ; Liu, X. ; Ojea, JA; Goldberg, K. Dex-net 2.0 : Apprentissage approfondi pour planifier des saisies robustes avec des nuages de points synthétiques et des métriques de saisie analytiques. Dans Proceedings of the Robotics: Science and Systems (RSS), Cambridge, MA, États-Unis, 12-16 juillet 2017.
7. Pinto, L. ; Gupta, A. Auto-supervision surdimensionnée : apprendre à saisir à partir de 50 000 essais et 700 heures de robot. Dans Actes de la conférence internationale IEEE 2016 sur la robotique et l'automatisation (ICRA), Stockholm, Suède, 16-21 mai 2016 ; pp. 3406-3413.
8. Schmidt, P. ; Vahrenkamp, N. ; Wächter, M. ; Asfour, T. Saisie d'objets inconnus à l'aide de réseaux de neurones convolutifs profonds basés sur des images de profondeur. Dans Actes de la conférence internationale IEEE 2018 sur la robotique et l'automatisation (ICRA), Brisbane, Australie, 21-25 mai 2018 ; pages 6831 à 6838.
9. Morrison, D. ; Corke, P. ; Leitner, J. Boucler la boucle de la saisie robotique : une approche de synthèse de saisie générative en temps réel. Dans Proceedings of the Robotics: Science and Systems (RSS), Pittsburgh, PA, États-Unis, 26-30 juin 2018.
10. Morrison, D. ; Corke, P. ; Leitner, J. Apprentissage d'une préhension robotique robuste, réactive et en temps réel. Int. J.Robot. Rés. 2020, 39, 027836491985906. [Référence croisée]
11. Yu, F. ; Koltun, V. Agrégation de contexte multi-échelle par convolutions dilatées. arXiv 2015, arXiv : 1511.07122.
12. Dune, C. ; Marchand, E. ; Collowet, C. ; Leroux, C. Estimation active de forme brute d'objets inconnus. Dans les actes de la conférence internationale IEEE/RSJ 2008 sur les robots et systèmes intelligents, Nice, France, 22-26 septembre 2008 ; pages 3622 à 3627.
13. Kraft, D. ; Pugeault, N. ; Ba¸seski, E. ; POPOVIC, M. ; Kragi´c, D. ; Kalkan, S. ; Wörgötter, F. ; Krüger, N. Naissance de l'objet : détection de l'objectivité et extraction de la forme de l'objet à travers des complexes objet-action. Int. J. Robot humanoïde. 2008, 5, 247-265. [Référence croisée]
14. Détry, R. ; Ek, CH; Madry, M. ; Piater, J. ; Kragic, D. La généralisation des saisies sur des objets en partie similaires. Dans Actes de la Conférence internationale IEEE 2012 sur la robotique et l'automatisation, St Paul, MI, États-Unis, 14-18 mai 2012 ; pp. 3791-3797.
15. Bloisi, DD; Pennisi, A. ; Iocchi, L. Modélisation de fond dans le domaine maritime. Mach. Vis. Appl. 2014, 25, 1257-1269. [Référence croisée]
16. Marchand, É.; Broche, F. ; Chaumette, F. ViSP pour l'asservissement visuel : Une plateforme logicielle générique avec une large classe de compétences de contrôle de robot. Robot IEEE. Automatique. Mag. 2005, 12, 40-52. [Référence croisée]
17. Kannala, J. ; Brandt, SS Un modèle d'appareil photo générique et une méthode d'étalonnage pour les objectifs conventionnels, grand angle et fish-eye. IEEE Trans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2006, 28, 1335-1340. [Référence croisée] [Pub Med]
18. Tsai, RY; Lenz, RK Une nouvelle technique pour l'étalonnage main/œil robotique 3D entièrement autonome et efficace. IEEETrans. Robot. Automatique. 1989, 5, 345-358. [Référence croisée]
19. Osokin, D. Estimation de pose multi-personnes 2D en temps réel sur CPU : OpenPose léger. arXiv 2018, arXiv : 1811.12004.
20. Cao, Z. ; Hidalgo, G. ; Simon, T. ; Wei, SE ; Sheikh, Y. OpenPose : Estimation de pose 2D multi-personnes en temps réel à l'aide de l'affinité de pièces Des champs. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2021, 43, 172-186. [Référence croisée] [Pub Med]
21. Howard, A. ; Sandler, M. ; Chu, G. ; Chen, L. ; Chen, B. ; Tan, M. ; Wang, W. ; Zhu, Y. ; Pang, R. ; Vasudevan, V. ; et coll. À la recherche de MobileNetV3. arXiv 2019, arXiv : 1905.02244.
22. Siciliano, B. ; Sciavico, L. ; Villani, L. ; Oriolo, G. Robotique—Modélisation, planification et contrôle ; Springer : Londres, Royaume-Uni, 2009.
23. Redmon, J. ; Divvala, S. ; Girshick, R. ; Farhadi, A. Vous ne regardez qu'une seule fois : détection d'objets unifiée et en temps réel. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Las Vegas, NV, États-Unis, 27-30 juin 2016 ; pp. 779-788.
24. Brooks, J. COCO Annotateur. 2019. Disponible en ligne : https://github.com/jsbroks/coco-annotator/ (consulté le 23 juillet 2024).

Machine Translated by Google

25. Ronchi, M. ; Perona, P. Analyse comparative et diagnostic d'erreur dans l'estimation de pose multi-instance. arXiv 2017, arXiv : 1707.05388.
26. Heartexlabs ; Lin, T. LabelImg. 2015. Disponible en ligne : https://github.com/heartexlabs/labelImg (consulté le 23 juillet 2024).

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Contrôle amélioré du rejet des perturbations actives pour les Moteur synchrone à aimant

Zhiwei Huang [1], Yuanhao Cheng 1,2,*, Si Chen 1,2, Xuhui Zhang [3], Jiawei Xiang 1,2 et Sun'an Wang [4]

[1] Collège de génie mécanique et électrique, Université de Wenzhou, Wenzhou 325060, Chine ; 22461440036@stu.wzu.edu.cn (ZH); 20200316@wzu.edu.cn (SC) ; jwxiang@wzu.edu.cn (JX)
[2] Institut de Pingyang et fabrication intelligente, Université de Wenzhou, Wenzhou 325035, Chine 3 Laboratoire clé du Shaanxi pour la surveillance intelligente des équipements électromécaniques miniers, Université des sciences et technologies de Xi'an, Xi'an 710064, Chine ;
[4] zhangxh@xust.edu.cn École de génie mécanique, Université Xi'an Jiaotong, Xi'an 710049, Chine ; sawang@xjtu.edu.cn
* Correspondance : yhcheng@wzu.edu.cn

Résumé : Pour améliorer les performances de contrôle d'un moteur synchrone à aimant permanent (PMSM) sous perturbations externes, un algorithme amélioré de contrôle de rejet de perturbations actives (IADRC) est proposé. Étant donné que la fonction non linéaire de l'algorithme ADRC conventionnel n'est pas suffisamment fluide aux points d'arrêt, ce qui affecte directement les performances de contrôle, une fonction non linéaire innovante est proposée pour améliorer efficacement la convergence et la stabilité. Sur cette base, l'IADRC proposé est construit et les résultats de simulation comparatifs avec l'ADRC et d'autres IADRC montrent qu'une vitesse de réponse plus rapide, une plus grande précision et une plus grande robustesse sont obtenues.

Mots clés : ADRC amélioré ; fonction non linéaire ; PMSM ; contrôle de vitesse

1. Introduction

En raison des avantages d'une densité de puissance élevée, d'une structure simple, d'un entretien facile et d'une régulation de vitesse pratique, les moteurs synchrones à aimant permanent (PMSM) sont largement utilisés dans les véhicules à énergie nouvelle, les machines-outils à commande numérique informatisée (CNC) et autres équipements haut de gamme [1 ,2]. La technologie de contrôle différentiel proportionnel intégral (PID), largement utilisée dans diverses industries, régit le système traditionnel de régulation de vitesse PMSM. Bien que le contrôleur PID présente les avantages d'une structure simple et d'une mise en œuvre facile [3,4], il est nécessaire d'établir un modèle mathématique précis de l'objet contrôlé pour obtenir un contrôle précis. Cependant, lors de la modélisation des PMSM, la structure du moteur est souvent simplifiée. Cette simplification s'est révélée insuffisante lorsque le PMSM fonctionne à faibles vitesses, entraînant une dégradation notable des performances de contrôle, comme le souligne la réf. [5]. De plus, le bruit et les interférences ne peuvent pas être correctement supprimés par le PID, c'est pourquoi les chercheurs ont proposé une variété de systèmes PID améliorés [6,7]. En optimisant les paramètres de réglage, les performances de contrôle peuvent être considérablement améliorées, mais la capacité anti-interférence, la vitesse de réponse et la précision doivent encore être améliorées.

La théorie moderne du contrôle fournit une nouvelle solution pour l'amélioration des performances des systèmes de contrôle. Parallèlement aux progrès de la technologie de contrôle PMSM, diverses méthodes de contrôle efficaces ont été proposées. D'après la Réf. [8], le contrôleur PID non linéaire améliore les performances de contrôle grâce à une transformation adaptative du signal d'erreur et à un ajustement dynamique des paramètres PID, ce qui permet au contrôleur d'atténuer efficacement le bruit dans le signal d'entrée et de résoudre un compromis entre la vitesse de réponse et le dépassement inhérent au PID conventionnel. contrôleurs. De plus, le PID flou est également adopté pour améliorer la robustesse du système [9]. De plus, le contrôle par mode glissant (SMC) est sans aucun doute apparu comme une avancée cruciale dans l'ingénierie du contrôle moteur ces dernières années [10,11]. Il peut améliorer l'efficacité du contrôle des systèmes PMSM tout en présentant une convergence rapide

check for updates

Citation : Huang, Z. ; Cheng, Y. ; Chen, S. ; Zhang, X. ; Xiang, J. ; Wang, S. Contrôle actif amélioré du rejet des perturbations pour le moteur synchrone à aimant permanent. Électronique 2024, 13, 3023. https://doi.org/10.3390/electronics13153023

Rédacteur académique : Fabio Corti

Reçu : 25 juin 2024
Révisé : 25 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

et une forte résistance aux interférences. Cependant, en raison des caractéristiques de broutage de la structure variable en mode glissant, la manière de supprimer efficacement ce broutage est devenue un sujet important. Le contrôle robuste est également une classe de méthodes destinées aux systèmes incertains, et des lois de contrôle robustes basées sur les paradigmes H∞ et la μ-synthèse ont été étudiées, qui permettent d'obtenir une bonne suppression des perturbations et une robustesse aux variations de paramètres [1 Bien que ces algorithmes améliorent efficacement l'effet de contrôle du système PMSM, ils ont encore du mal à atteindre des performances de contrôle supérieures lorsqu'il s'agit de traiter les incertitudes des modèles et de gérer les interférences externes.

Le contrôle actif par rejet de perturbations (ADRC) est une stratégie de contrôle non linéaire proposée par Jingqing Han, qui peut gérer efficacement les incertitudes et les perturbations externes [13]. L'utilité de cette approche se reflète dans sa capacité anti-interférence supérieure, sa forte adaptabilité aux changements et à l'incertitude des paramètres du système, sa haute précision de contrôle, sa vitesse de réponse rapide, sa structure simple et sa mise en œuvre facile [14], et elle a attiré une large attention dans de nombreux domaines techniques [15-17]. L'ADRC se compose principalement de trois composants : le différenciateur de suivi (TD), l'observateur d'état étendu (ESO), ainsi que la loi de contrôle par retour d'erreur d'état non linéaire (NLSEF). Le TD peut lisser le signal d'entrée, réduire l'influence du bruit et fournir des informations différentielles sur le signal pour aider le contrôleur à mieux répondre aux changements dans le système. L'ESO est le composant principal de l'ADRC, utilisé pour estimer les variables d'état et les perturbations totales du système. Il a la capacité d'observer et d'atténuer les incertitudes et les perturbations externes en temps réel, améliorant ainsi la robustesse et la résistance aux interférences du système. De plus, le NLSEF génère des commandes de contrôle basées sur l'erreur d'état observée ainsi que sur les informations de perturbation pour obtenir un contrôle précis de l'objet contrôlé. La stratégie de contrôle par rétroaction non linéaire fournie par le NLSEF peut améliorer considérablement la réponse dynamique du système . L'ADRC hérite de l'essence du PID traditionnel et peut contrôler efficacement les systèmes avec non-linéarité et incertitude sans s'appuyer sur des modèles précis [18,19]. Par exemple, sur la base de l'ADRC et du contrôle du mode glissant, Fang et al. [20] ont proposé une nouvelle méthode de conception intégrée de boucles de vitesse et de position et ont réalisé le contrôle de vitesse et de position des PMSM. Tout en parvenant à un dépassement minimal du système, la complexité de la configuration des paramètres reste un défi. Pour répondre à ce problème, Li et al. [21] ont introduit un ADRC en mode glissant , remplaçant l'ESO par un observateur de perturbations non linéaire pour rationaliser les ajustements des paramètres. S'appuyant sur leurs recherches, Ge et al. [22] ont utilisé un algorithme d'optimisation d'essaim de particules pour améliorer l'ADRC pour le contrôle d'attitude des engins spatiaux. Au lieu de dépendre d'une sélection empirique, les paramètres sont désormais déterminés via une optimisation mathématique . Réf. [23] ont proposé un ADRC flou d'ordre fractionnaire, qui atténue les limitations des méthodes de contrôle conventionnelles (telles que la faible précision et la réponse lente), et il est utilisé pour gérer les nombreux contrôles de mouvement articulaires du manipulateur. Ramlavi et Chidan [24] ont étudié l'approche de contrôle de suivi du contrôle de rejet actif linéaire des perturbations pour améliorer les performances de suivi et la robustesse du contrôleur et ont résolu l'incertitude du modèle et les perturbations environnementales d'un robot à une seule roue. S'appuyant sur les recherches de Partovibakhsh et Liu [25], Guo et Zhao [26] ont amélioré les capacités de suivi des robots mobiles grâce au mécanisme de compensation de l'ADRC. Lv [27] propose une méthode de contrôle de rejet automatique des perturbations floues (Fuzzy-ADRC) pour un onduleur triphasé à quatre bras permettant de supprimer les pulsations du couple moteur dans des conditions de fonctionnement complexes. Wang [28], en réponse aux mauvaises performances de contrôle causées par les paramètres fixes de l'ADRC pour un PMSM sans roulement, propose une méthode d'ajustement dynamique des paramètres pour l'ADRC basée sur un algorithme génétique et un réseau neuronal de rétropropagation. Fang [29] a proposé une méthode ADRC basée sur un ESO amélioré pour concevoir un contrôleur de cascade d'actionneurs électromécaniques pour les PMSM.

Bien que la technologie ADRC améliore efficacement l'effet de contrôle des systèmes non linéaires et incertains, il existe encore des limites, telles que l'insuffisance de méthodologies efficaces de paramétrage, le manque de capacité d'estimation pour les perturbations à variation rapide dans le temps et la fonction fal adoptée par l'ADRC traditionnel. étant suffisamment lisse aux points de commutation entre la section non linéaire et la section linéaire [30,31]. Compte tenu des défis actuellement rencontrés dans les systèmes de contrôle PMSM avec contrôleurs ADRC, cet article

Machine Translated by Google

apportent la contribution suivante : une fonction non linéaire polynomiale combinée à une fonction cosinus est proposée pour améliorer la fonction fal , ce qui améliore efficacement la douceur de la fonction non linéaire et renforce la robustesse de l'ADRC. Les résultats de l'enquête indiquent que, contrairement à l'ADRC conventionnel et à d'autres ADRC améliorés (IADRC), l'IADRC proposé ici amplifie considérablement la vitesse de réponse, la précision et la robustesse du système .

La structure organisationnelle de ce document est décrite ci-dessous. La section 2 présente le modèle mathématique du PMSM. La section 3 présente la stratégie d'amélioration de l'ADRC et construit un contrôleur IADRC. Dans la section 4, une conception du système de contrôle de vitesse PMSM employant l'IADRC proposé est présentée. Dans la section 5, l'expérience de simulation et l'analyse sont effectuées, et les bonnes performances de contrôle de l'IADRC proposé pour les systèmes PMSM sont vérifiées.

2. Modélisation mathématique du PMSM

La structure du rotor et la distribution des aimants permanents du PMSM [32] sont illustrées à la figure 1. Selon leurs caractéristiques structurelles, les PMSM peuvent être divisés en deux types : montés en surface et intégrés. Le PMSM monté en surface est également appelé PMSM à pôle non saillant. Parce que sa perméabilité est très proche de la perméabilité au vide, la variation entre la réluctance et l'inductance est très faible, ce qui confère au rotor de bonnes caractéristiques de pôles non saillants. Cela confère également au champ magnétique de l' aimant permanent une distribution approximativement sinusoïdale et au moteur de meilleures performances. Pour le PMSM intégré, la réluctance de l'axe direct est bien supérieure à celle de l'axe en quadrature, donc l'inductance de l'axe direct est bien inférieure à celle de l'axe en quadrature et le rotor a des caractéristiques de pôles saillants, il est donc également appelé pôle saillant PMSM. Le PMSM intégré réalise un contrôle sans capteur grâce à l' effet de pôle saillant et augmente la densité de puissance grâce au couple de résistance électromagnétique.
Cependant, la structure du rotor est complexe, le coefficient de fuite du flux magnétique est important et le coût de fabrication est élevé.

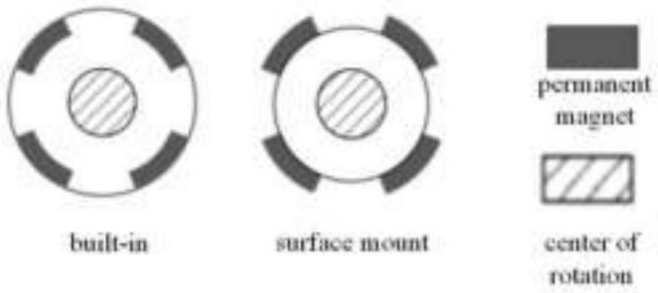


Figure 1. Diagramme schématique des structures de rotor PMSM.

En raison des différentes structures des PMSM, leurs modes de fonctionnement et la formation de leurs couples électromagnétiques seront également différents. Par conséquent, pour obtenir un meilleur effet de contrôle, il est nécessaire de formuler une variété de schémas de contrôle différents en fonction des structures internes des PMSM. Considérant que le PMSM monté en surface a un faible coût et la même inductance que l'axe dq, il est plus simple d'établir l'équation du couple électromagnétique . Par conséquent, le PMSM monté en surface est sélectionné dans cette étude.

Pour analyser le modèle mathématique du PMSM triphasé, les hypothèses suivantes sont faits pour la commodité de l'analyse :

(1) Ignorer la réticence des noyaux du stator et du rotor, sans tenir compte des pertes dues à courants de Foucault ou hystérésis.

(2) Le matériau de l'aimant permanent est non conducteur et sa perméabilité est équivalente à celui de l'air.

(3) Le rotor ne comporte aucun bobinage amortisseur.

Machine Translated by Google

(4) Le champ magnétique d'excitation de l'aimant permanent et le champ magnétique de réaction d'induit de l'enroulement triphasé sont répartis de manière sinusoïdale à travers l' entrefer.

(5) La forme d'onde de la force électromotrice induite dans l'enroulement de phase suit une courbe sinusoïdale.

modèle.

En supposant que les conditions susmentionnées soient remplies, selon l' induction électromagnétique et la loi de tension de Kirchhoff, l'équation de tension d'un PMSM triphasé dans le système de coordonnées naturelles peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} = dt\ d\psi b\ \frac{d\psi a}{} + Rsia\ ua \\ ub = \frac{}{dt} + Rsis \\ uc = dt\ \frac{d\psi c}{} + Rsic \end{aligned} \quad (1)$$

L'équation de tension statorique du PMSM dans un système de coordonnées tournant biphasé peut être obtenu par la transformée de Clarke et la transformée de Park [33] :

$$\begin{aligned} d\psi q \quad & \frac{d\psi d}{} + Rsid - \omega e\psi q\ ud = dt \\ & \frac{}{} + Rsiq + \omega e\psi d\ uq = dt \end{aligned} \quad (2)$$

L'équation de la chaîne du magnétisme du stator est :

$$\begin{aligned} \psi d = Ldid + \psi f\ \psi q = \\ Lqiq \end{aligned} \quad (3)$$

Le fait de ramener l'équation (3) dans (2) donne :

$$\begin{aligned} d\psi q \quad & \frac{d\psi d}{} + Rsid - \omega eLqiq\ ud = dt \\ & \frac{}{} + Rsiq + \omega e(Ldid + \psi f\ )\ uq = dt \end{aligned} \quad (4)$$

où ua, ub, uc sont les tensions triphasées de l'enroulement du stator, avec V comme unité ; Rs est la résistance statorique, avec Ω comme unité ; ia, ib, ic sont le courant triphasé de l'enroulement du stator, avec A comme unité ; ψa, ψb, ψc sont le flux de l'enroulement du stator, avec Wb comme unité ; ψf est la liaison de flux magnétique permanent, avec Wb comme unité ; Ld, Lq sont les composantes de l'inductance du stator sur l'axe dq, respectivement, avec H comme unité ; ωe représente la vitesse angulaire électrique du moteur, avec rad/s comme unité.

En analysant les composantes du couple résistant et du couple dynamique, l' équation du mouvement mécanique du moteur est dérivée :

$$J.\frac{d\omega m}{} = Te - B\omega m - T\ dt \quad (5)$$

où J est le moment d'inertie, T est le couple de charge et B est le coefficient de frottement visqueux.

Par transformation de Clarke et transformation de Park, l'équation du couple électromagnétique est obtenue ci-dessous :

$$Te = \frac{3}{2} pn\ \psi f\ iq + (Ld - Lq)idiq \quad (6)$$

où Te est le couple électromagnétique ; 3/2 est le coefficient lorsque le principe de transformation d'amplitude égale est adopté ; Pn concerne le nombre total de paires de pôles du moteur.

L'équation du mouvement mécanique transformée est :

$$J\frac{d\omega m}{dt} = \frac{3}{2} pn\ \psi f\ iq + (Ld - Lq)idiq - B\omega m - T \quad (7)$$

3. Conception d'un contrôleur ADRC amélioré

L'ADRC traditionnel traite l'incertitude, les perturbations internes du système et les perturbations externes collectivement comme la perturbation globale du système. Et cela peut réaliser de réels-

Machine Translated by Google

estimation précise et compensation temporelle de cette perturbation à l'aide de l'ESO et du NLSEF. Cette approche ne repose pas sur un modèle exact de la centrale et améliore considérablement les capacités anti-interférences. Cependant, la fonction fal de l'ADRC traditionnelle n'est pas suffisamment fluide aux points de commutation entre la section non linéaire et la section linéaire, ce qui fait que l'effet de contrôle n'est pas idéal. Par conséquent, un contrôleur ADRC amélioré, soutenu par une fonction fal améliorée , est proposé dans cet article.

3.1. Conception améliorée des fonctions Fal

La fonction fal est une fonction non linéaire qui joue un rôle essentiel dans l'ADRC. Cela permet non seulement à ADRC de mieux estimer et compenser les perturbations du système, améliorant ainsi les performances anti-perturbations du système, mais permet également d'atténuer l'amplification lorsque l'erreur est importante et d'augmenter lorsque l'erreur est faible. Il est avantageux d'améliorer la vitesse de réaction du système face à des erreurs importantes et la précision du contrôle face à de petites erreurs, tout en améliorant la robustesse et l'adaptabilité du système.

Dans l'ADRC traditionnel, fal(e, α, δ), en tant que fonction non linéaire cruciale, peut estimer efficacement les perturbations internes et externes du système, générant ainsi le signal de sortie de l'ADRC. La forme de la fonction fal est présentée dans l'équation (8) :

$$f\,al(e, \alpha, \beta) = \begin{cases} |e|^{\alpha} \operatorname{signe}(e), & |e| \geq \delta, \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| < \delta \end{cases} \tag{8}$$

En prenant δ = 0,001, lorsque α prend des valeurs différentes, la courbe de la fonction fal est représentée sur la figure 2.

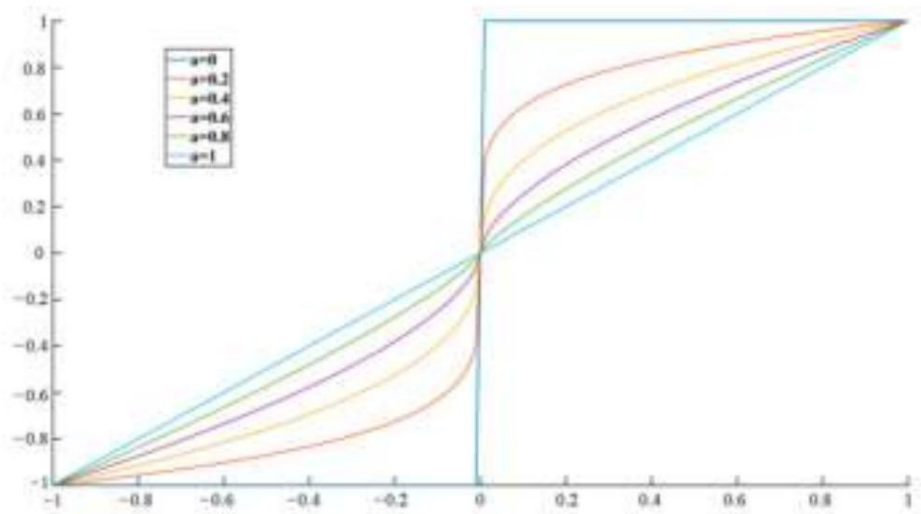


Figure 2. Courbes de fal(e, α, δ) fonctionnent sous différentes valeurs de α .

Du point de vue de la convergence, l'attracteur terminal $|e|^{\alpha}\operatorname{sign}(e)$ est convergent en temps fini , particulièrement adapté au contrôle proche de l'étage d'origine (|e| < 1), ce qui a un effet d'amplification sur l'erreur, mais ne convient pas au contrôle loin de l' étage d'origine, et le la convergence sera plus lente que le contrôle linéaire classique. Le terme linéaire est exponentiellement convergent, ce qui convient au contrôle loin de l'origine (|e| > 1).

Cependant, dans la fonction fal , l'utilisation du terme attracteur terminal et du terme linéaire est inversée, ce qui fait converger la fonction fal dans son ensemble en temps non fini, quelle que soit la taille de l'erreur initiale e(0), donc le le terme linéaire peut être amélioré pour améliorer la capacité de convergence.

D'après l'équation (8), il est évident que les valeurs dérivées aux points d'arrêt diffèrent après application de la dérivée de la fonction fal . Et on peut également voir sur la figure 2 que les courbes de fonction fal(e, α, δ) sont continues mais pas lisses lorsque e = |δ|, et qu'il y a un changement soudain, ce qui entraînera de mauvaises performances de contrôle du système. .

Machine Translated by Google

Sur la base des problèmes ci-dessus, une fonction polynomiale non linéaire lfal(e, α, δ) combinant des fonctions linéaires et trigonométriques est proposée dans cet article. Les raisons de l'adoption d'une combinaison de fonctions trigonométriques et de polynômes sont les suivantes :

(1) Les fonctions trigonométriques et les polynômes ont des formes mathématiques explicites, ce qui rend ils sont faciles à traiter analytiquement et théoriquement.

(2) Des fonctions trigonométriques et des polynômes correctement conçus peuvent réduire les dépassements du système et améliorer la vitesse de réponse et la stabilité du système.

(3) Bien que la fonction trigonométrique ajoutée rend lfal plus complexe que la fonction fal d'origine , l'efficacité du calcul peut être améliorée par la table de recherche et les méthodes d'interpolation, et un meilleur effet de contrôle peut être obtenu en garantissant un temps réel performances et des exigences matérielles inférieures.

L'expression de la fonction est présentée ci-dessous :

$$Je\ f\ al(e, \alpha, \beta) = \begin{cases} |e|^{\alpha} signe(e)\ k1 & , |e| \geq \delta \\ \frac{}{\delta\alpha - 3 e cos(e-\delta)\ k1} - \frac{}{\delta^{g-2}\ k2\ cos(e-\delta)} + k3\delta + \alpha\delta\alpha - 1\ e, & |e| < \delta k2 \end{cases} \quad (9)$$

L'idée de conception de la fonction est la suivante : étant donné que le principal problème de la fonction fal originale est que les segments ne sont pas assez lisses, la fonction linéaire d'origine est transformée en une fonction polynomiale combinée avec une fonction trigonométrique et une fonction linéaire lorsque |e | ≤ δ dans cet article. Ensuite, selon la condition que la fonction fal est continue au niveau des segments et que les valeurs de la fonction dérivée sont égales, la relation entre les trois coefficients constants de k1, k2 et k3 est obtenue.

Sur la base des idées ci-dessus, on peut savoir que lorsque e = |δ|, les valeurs de la fonction des deux côtés de la fonction lfal sont égales, et après avoir pris la dérivée de la fonction lfal , les valeurs dérivées des deux côtés sont également égales. .

À la lumière des concepts évoqués ci-dessus, l'équation suivante est établie :

$$\begin{aligned} Si\ f\ al-(e, \alpha, \beta) &= l\ f\ al+(e, \alpha, \beta) \\ l\ f\ al'-(e, \alpha, \beta) &= l\ f\ al'+(e, \alpha, \beta) \end{aligned} \quad (dix)$$

L'expression dérivée de la fonction lfal , après calcul, est la suivante :

$$Je\ f\ al'(e, \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha\delta(\alpha-1) & , |e| > \delta \\ \delta\alpha - 3 e(k1-1) - \delta^{\alpha-2} e\ (k2-1) + \alpha\delta(\alpha-1) & , |e| \leq \delta \end{cases} \quad (11)$$

En combinant les équations (10) et (11), nous pouvons dériver l'équation (12).

$$\frac{\delta\alpha - 3 e k1\ cos(e-\delta)}{\delta\alpha - 3 e k1\ (k1-1) - \delta^{\alpha-2} e} - \frac{\delta^{g-2}\ k2\ cos(e-\delta) + k3\delta + \alpha\delta\alpha - 1\ e}{\alpha\delta(\alpha-1) = \alpha\delta(\alpha-1)} = |e|\ k2\ (k2-1) + {}^{\alpha} signe(e) \quad (12)$$

Quand |e| = δ, l'équation (3) se simplifie sous la forme suivante :

$$\frac{\delta\ k1+\alpha-3}{k1} - \frac{\delta\ k2+\alpha-2}{-} + k3\delta + \alpha\delta = \delta\ k2\ \delta\ k1+\alpha-3^{\alpha} \quad (13)$$

$$\delta\ k2+\alpha-2 + \alpha\delta\alpha - 1 = \alpha\delta\alpha - 1$$

Ensuite, la relation pour k1, k2 et k3 est dérivée, k2 = k1 − 1, k3 = k1 (k1−1) qui est introduite dans la fonction lfal pour obtenir la nouvelle $\frac{k1\ 2-k1+1}{} - \alpha,$ fonction non linéaire :

$$Je\ f\ al(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^{\alpha} signe(e) & , |e| > \delta \\ \frac{}{\delta\alpha - 3 e k1\ cos(e-\delta)\ k1} - \frac{}{\delta^{g-2}\ k1-1\ cos(e-\delta)}\ \delta\ k1+\alpha-3 + \frac{}{\alpha\delta(k1-1)} & |e| \leq \delta + (1-\alpha)\delta\ \alpha + k1-1\ k1 \end{cases} \quad (14)$$

Les courbes de fonction fal avant et après amélioration sont tracées par MATLAB 2020a de MathWorks et sont illustrés à la figure 3.

Machine Translated by Google

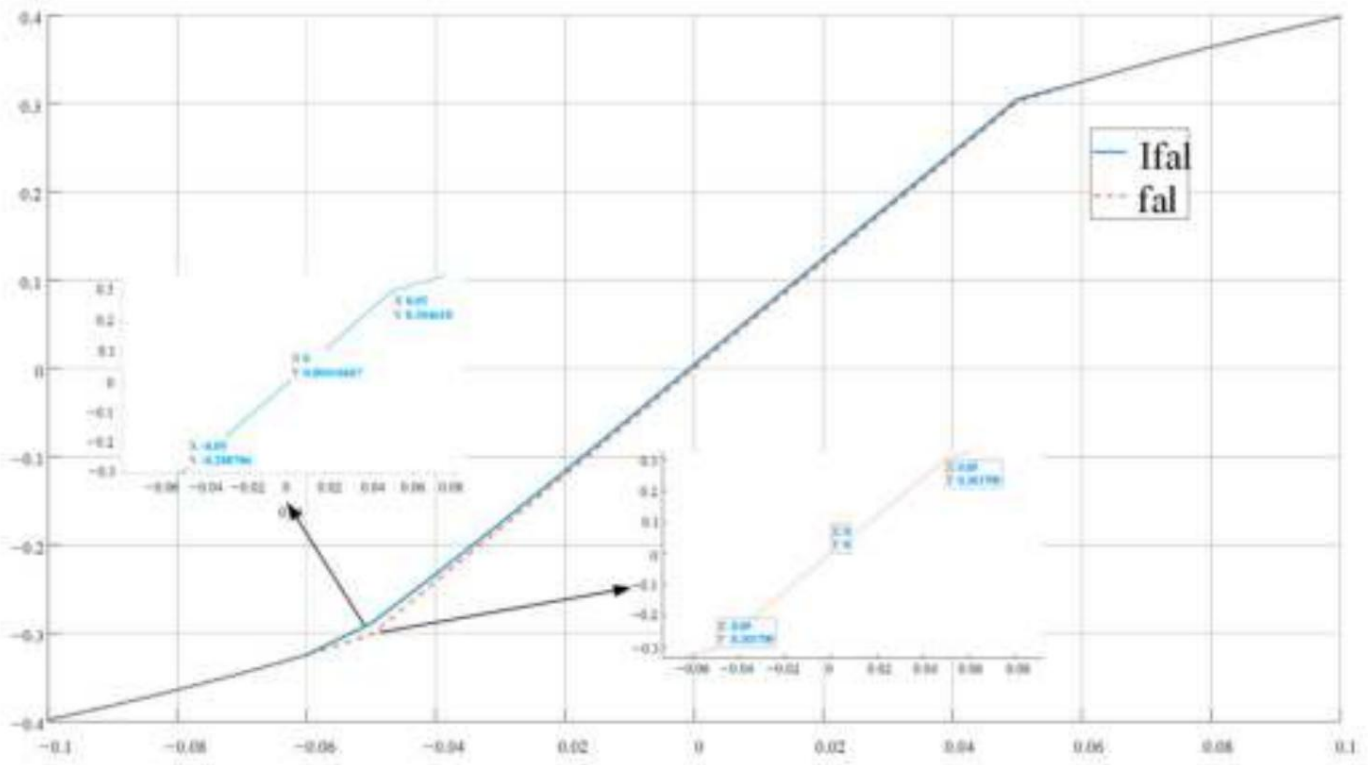


Figure 3. Courbes de fonction fal(e, α, δ) avant et après amélioration.

On peut voir sur le graphique que la courbe de la fonction Ifal(e, α, δ) est plus lisse que celle de la fonction fal . La fonction Ifal est continue et dérivable aux points qui |e| = δ. Dans la plage de (−0,06, 0,06), le résultat de la fonction Ifal est supérieur à celui de la fonction fal , c'est-à-dire que la fonction Ifal converge plus rapidement et plus facilement.

3.2. Conception ESO améliorée (IESO)

De plus, la SIERE sert de noyau au IADRC. Il fournit non seulement l' estimation de l'état du système PMSM, mais classe également tous les types de perturbations internes et externes, en plus des incertitudes comprenant l'intégralité des perturbations du système PMSM, et estime et compense la perturbation totale en temps réel. Semblable à l'ESO, la SIERE s'appuie uniquement sur les données d'entrée et de sortie du système et n'exige pas un modèle mathématique précis des perturbations. Cette approche améliore efficacement les performances et la robustesse du système de contrôle. La formulation de la SIERE est la suivante :

$$\begin{aligned} e2 &= z21 - n = \\ \dot{z}_{21} &= bu(t) + z22 - k31\, Je\, f\, al(e2, \alpha 2, \delta 2) = -k32\, Je \\ \dot{z}_{22} &= f\, al(e2, \alpha 2, \delta 2) \end{aligned} \tag{15}$$

3.3. Conception NLSEF améliorée (INLSEF)

Le NLSEF réalise le contrôle efficace de la non-linéarité, de l'incertitude et des perturbations externes dans l'ADRC et améliore les performances et la robustesse du contrôle du système. La fonction fal est un élément non linéaire clé du NLSEF pour le traitement des signaux d'erreur. Il peut manipuler l'amplification de manière adaptative en fonction de l'ampleur de l'erreur, en diminuant le gain dans les cas d'erreur substantielle et en augmentant le gain lorsque l'erreur est minime, améliorant ainsi la précision et la robustesse du mécanisme de commande. L'expression de l' INLSEF est la suivante :

$$\begin{aligned} e1 &= z11 - z21\, z22 + k2 \\ u(t) &= - \frac{je\, f}{al(e1, \alpha 1, \delta 1)\, b} \end{aligned} \tag{16}$$

Machine Translated by Google

où z21 représente une observation de la réponse dynamique du contrôleur, tandis que z21 désigne une observation de la perturbation, b est le facteur de compensation et k2 est le gain du régulateur.

3.4. Conception d'un système de contrôle de vitesse PMSM basé sur le projet proposé par l'IADRC

La figure 4 représente le diagramme schématique du système de contrôle de vitesse PMSM proposé par l'IADRC . Le contrôleur contrôle indirectement la vitesse et le couple du PMSM en contrôlant la sortie de l'onduleur. Le système adopte un double contrôle en boucle fermée, dans lequel la boucle de courant fonctionne sous PI, tandis que la boucle de vitesse est contrôlée par le IADRC proposé.

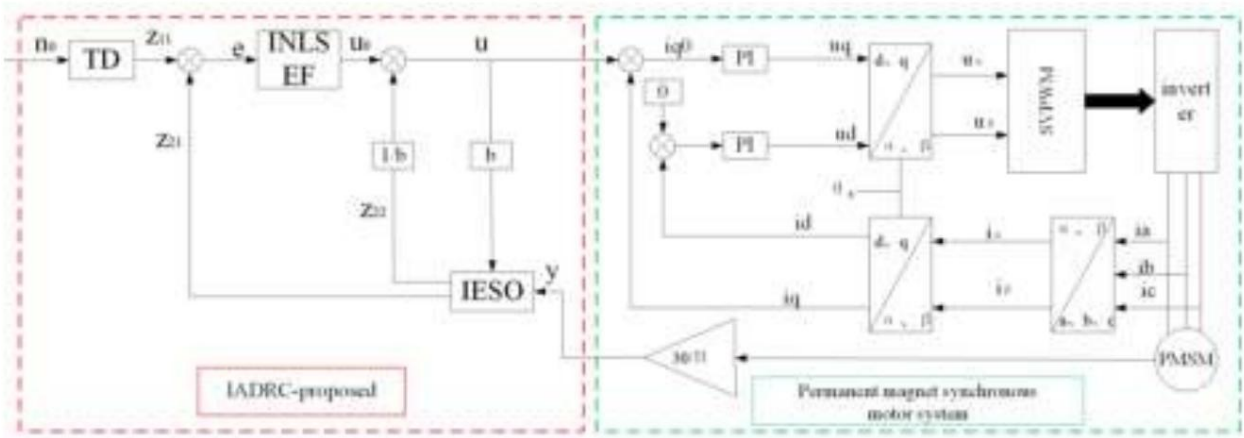


Figure 4. Schéma décrivant le système de contrôle de vitesse proposé par le IADRC du PMSM.

4. Simulation et évaluation expérimentale

Pour vérifier l'effet de l'algorithme proposé par l'IADRC sur le contrôle de vitesse PMSM, l' ADRC traditionnel, le SMC, le PID flou et l'IADRC dans la réf. [34] sont adoptés comme algorithmes de comparaison. Les modèles de système de régulation de vitesse PMSM basés sur ces cinq algorithmes de contrôle sont construits dans MATLAB/Simulink, et les expériences de comparaison de simulation sont ensuite réalisées. Les spécifications du PMSM dans les modèles de simulation sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Spécifications du PMSM.

Caractéristiques	Valeur
Résistance de phase statorique R (Ohm)	2.785
Inductance d'axe direct du stator LD (H)	8,5 × 10−3
Inductance transversale du stator LQ (H)	8,5 × 10−3
Liaison de flux à aimant permanent ψf (Wb)	0,175
Inertie J (kg·m2/rad)	1 × 10−3
Paires de pôles, P	
Coefficient de frottement B	4 1 × 10−4

La méthodologie incorporée dans ce manuscrit est définie comme suit : la vitesse attendue du PMSM est de 1 500 tr/min. Pour vérifier la robustesse de l'algorithme proposé par l'IADRC , un couple de charge est d'abord ajouté. Lorsque la vitesse réelle atteint la vitesse attendue et est stable, le couple de charge de 2 N·m est soudainement appliqué à l'arbre de sortie du PMSM à 0,1 s pour comparer la courbe de réponse à vide et la capacité anti-interférence du PMSM sous l'action. des cinq algorithmes de contrôle ci-dessus. La durée expérimentale totale est de 0,15 s.

Les réglages des paramètres dans l'algorithme proposé par l'IADRC sont les suivants. Selon les descriptions spécifiques des trois composantes de l'ADRC dans la section 3, les deux paramètres α, δ dans le TD et le NLSEF sont définis sur la base de l'expérience, α1 = 0,4, δ1 = 0,09, α2 = 0,4, δ2 = 0,09. Les deux paramètres de l'ESO sont déterminés par simulation et réglage continus : α3 = 0,25, δ3 = 0,04. Coefficient de vitesse k1 dans le TD, gain du régulateur k2 et facteur de compensation b du NLSEF, dérivés du modèle mathématique et des paramètres du PMSM

Machine Translated by Google

système, sont pris comme k1 = 5355, k2 = 5000, b = 1030,66, respectivement. De même, l'étalonnage les gains de sortie dans l'ESO sont pris comme k31 = 8 500, k32 = 500 000. Les paramètres clés dans les contrôleurs sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Les valeurs des paramètres clés du contrôleur.

Composant	Caractéristiques	Valeur
TD	Facteur de suivi α1	0,4
	Facteur de filtre δ1	0,09
	Facteur de vitesse k1	5355
NLSEF	Facteur de suivi α2	0,4
	Facteur de filtre δ2	0,09
	Gain du régulateur k2	5000
	Facteur de rémunération b	1030.66
ESO	Facteur de suivi α3	0,25
	Facteur de filtre δ3	0,04
	Les gains de calibrage de la sortie k31	8500
	Les gains de calibrage de la sortie k32	500 000

Selon les réglages des paramètres ci-dessus, les trois algorithmes sont appliqués au Contrôle de vitesse du PMSM. Les résultats de l'expérience sont présentés ci-dessous :

Il ressort des figures 5 et 6 que, lors de la phase initiale de démarrage du PMSM, le IADRC proposé dans cet article a le meilleur effet parmi les trois algorithmes. Non seulement il n'a pas dépassement mais atteint et se stabilise également à la vitesse attendue à 0,027 s. Le maximum La valeur de fluctuation d'erreur est de 31,28 tr/min, soit environ 2,09 % de la vitesse attendue. Le IADRC dans Réf. [34] a besoin de 0,045 s pour atteindre et se stabiliser à la vitesse attendue, et le le dépassement est de 61,64 tr/min, soit environ 4,11 % de la vitesse attendue. Et le temps pour le L'ADRC traditionnel pour atteindre et se stabiliser à la vitesse attendue est de 0,085 s, et son dépassement est également le plus grand, soit 119,04 tr/min, soit environ 7,89 % de la vitesse attendue. Le SMC nécessite 0,075 s pour atteindre et se stabiliser à la vitesse attendue, avec un dépassement maximum de 423,71 tr/min, soit environ 28,25 % de la vitesse attendue. Le PID flou prend 0,043 s pour atteindre et stabiliser la vitesse attendue, avec une fluctuation d'erreur maximale de 30,27 tr/min, soit environ 2,02 % de la vitesse attendue.

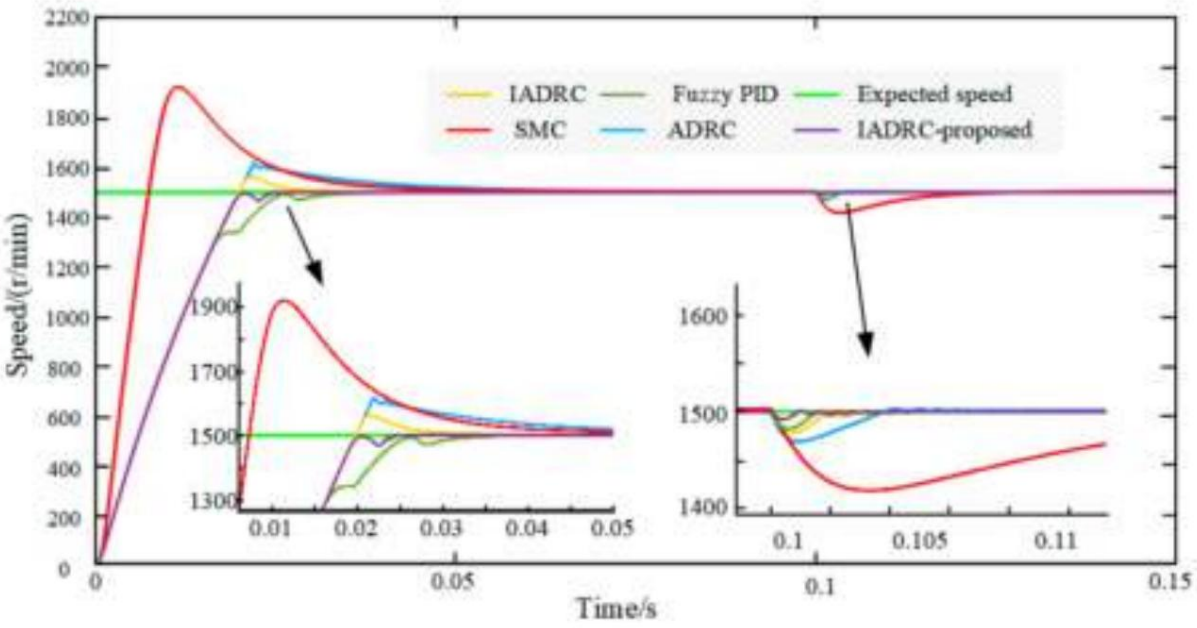


Figure 5. Courbes de réponse en vitesse de 5 algorithmes sans bruit gaussien.

Machine Translated by Google

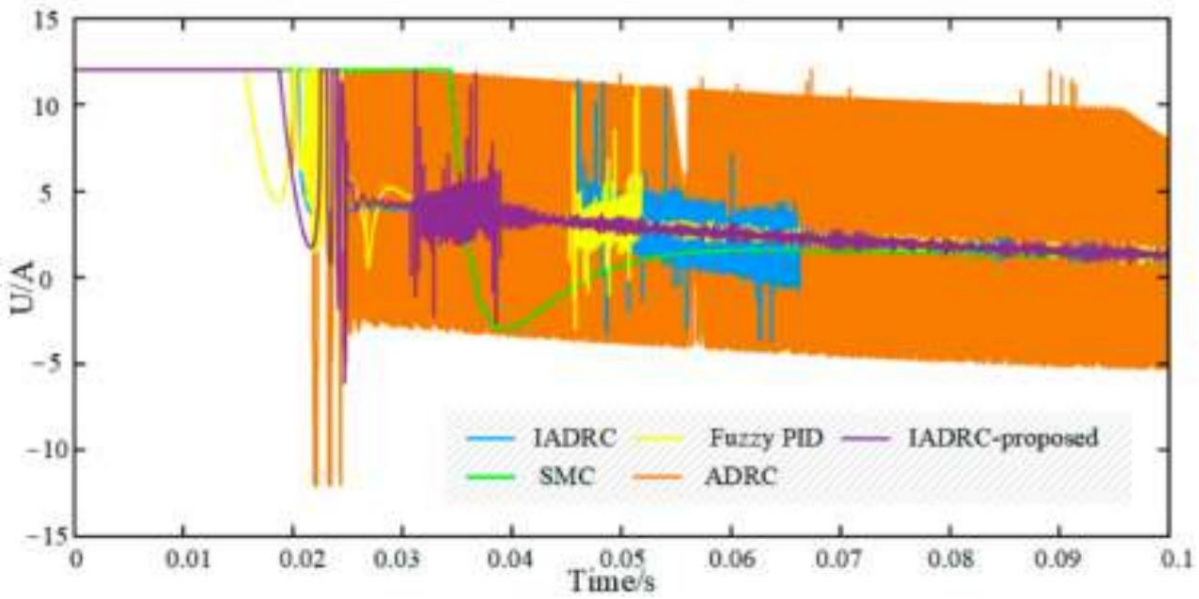


Figure 6. L'usine contrôle les entrées de 5 algorithmes sans bruit gaussien.

Lorsque la vitesse du PMSM est stabilisée à la vitesse attendue, le couple de charge échelonné est appliqué à 0,1 s. L'algorithme IADRC proposé dans cet article n'est fondamentalement pas affecté et la courbe de vitesse ne fluctue que légèrement. L'erreur de vitesse maximale est de 7,39 tr/min, soit environ 0,49 % de la vitesse attendue, puis revient rapidement (0,004 s) à la valeur attendue. La courbe de vitesse de l'algorithme IADRC dans la réf. [34] ont produit une erreur de vitesse maximale de 20,73 tr/min, soit environ 1,38 % de la vitesse attendue, et sont revenus à la valeur attendue après 0,006 s. Et la courbe de vitesse de l'algorithme ADRC traditionnel produit une erreur de vitesse maximale de 29,85 tr/min, soit environ 1,99 % de la vitesse attendue, et revient à la valeur attendue après 0,034 s. La courbe de vitesse de l'algorithme SMC produit une erreur de vitesse maximale de 81,98 tr/min, soit environ 5,47 % de la vitesse attendue, et revient à la valeur attendue après 0,028 s. La courbe de vitesse de l'algorithme PID flou produit une erreur de vitesse maximale de 18,11 tr/min, soit environ 1,21 % de la vitesse attendue, et revient à la valeur attendue après 0,07 s.

Divers facteurs incertains affectent le système PMSM dans la pratique, tels que le bruit ambiant et les changements de résistance provoqués par le fonctionnement continu du moteur ou les changements de température ambiante. Pour vérifier la robustesse de l'algorithme proposé par l'IADRC sous différentes variations de paramètres et incertitudes, des expériences de simulation d'interférence sonore et de changement de résistance du moteur sont ajoutées au système.

Pour vérifier la robustesse de l'algorithme proposé par l'IADRC, cet article comprend également des expériences comparatives de l'entrée de contrôle de l'usine U sous bruit gaussien, en la comparant avec d'autres algorithmes. Le bruit gaussien est ajouté au début et le signal est défini pour avoir une moyenne de 1 et une variance de 200. D'autres paramètres du moteur sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 7 et 8.

En comparant les figures 5 à 8, il est évident que les courbes de réponse en vitesse et la sortie du système U ne changent pas de manière significative avant et après l'ajout du bruit gaussien pour les cinq algorithmes. De plus, les courbes de réponse en vitesse et la sortie du système U contrôlée par l'algorithme proposé par l'IADRC ont le temps d'oscillation le plus court et la plus petite amplitude d'oscillation, ce qui vérifie la stabilité de l'algorithme proposé par l'IADRC.

Pour valider davantage l'impact des changements de résistance du moteur sur le modèle proposé par l'IADRC, les résistances du moteur sont fixées à 2,5875, 2,875 et 3,1625, respectivement. Les autres paramètres sont conformes au tableau 1. Les résultats expérimentaux sont présentés à la figure 9.

Machine Translated by Google

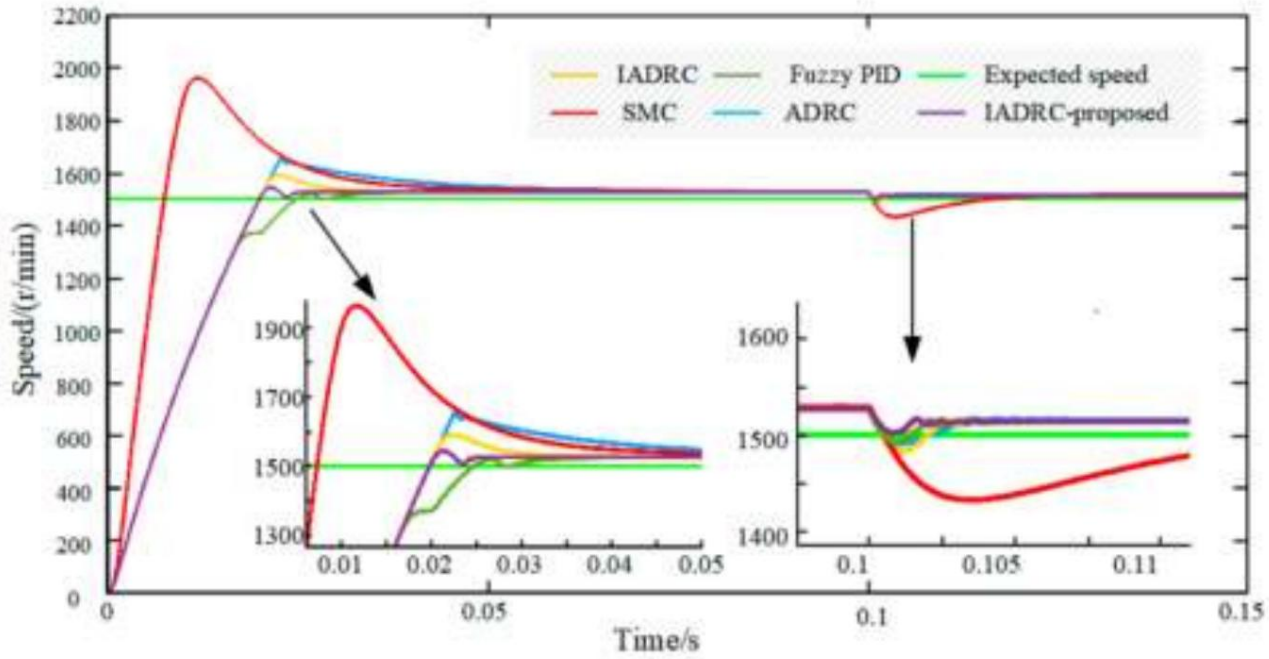


Figure 7. Courbes de réponse vitesse de 5 algorithmes sous bruit gaussien.

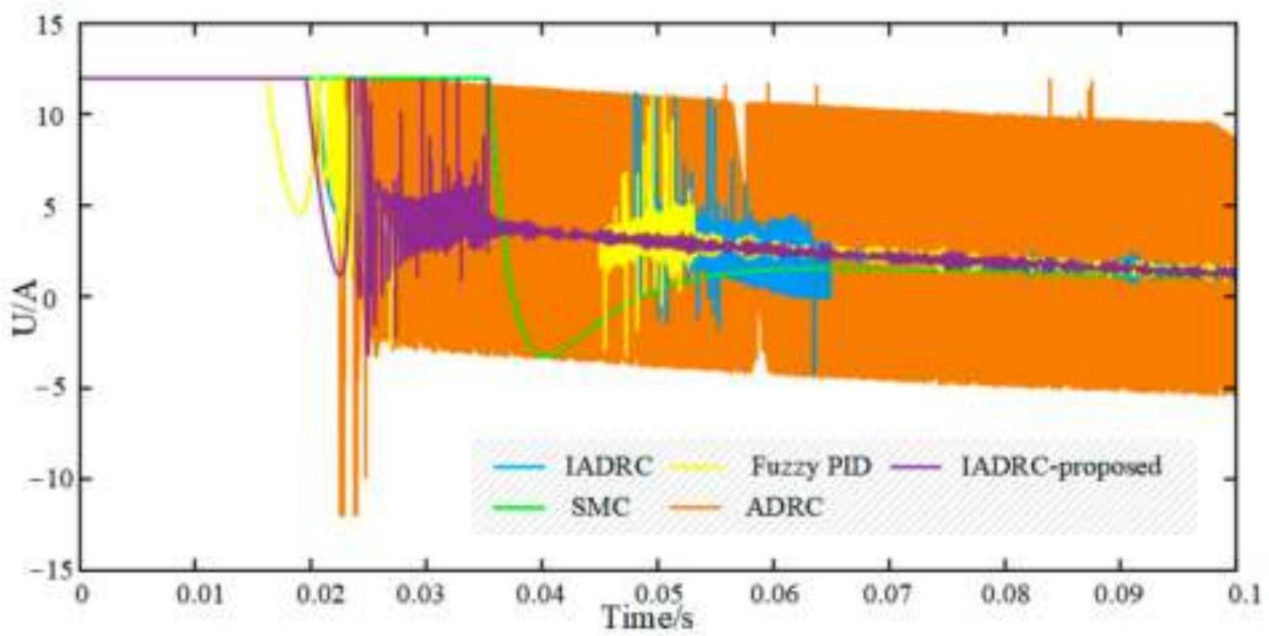


Figure 8. L'usine contrôle les entrées de 5 algorithmes sous bruit gaussien.

D'après la figure 9, il est évident que même si le dépassement et le temps nécessaire pour atteindre la stabilité changent tous, le changement est léger. Cela indique qu'après des changements dans les conditions externes, l'effet de contrôle est toujours très bon, confirmant la robustesse de l'algorithme proposé par l'IADRC .

En résumé, il est effectivement prouvé que notre IADRC présenté présente une réactivité améliorée, une précision de contrôle plus élevée, une robustesse et une capacité anti-interférence plus fortes. Les performances spécifiques sont les suivantes : notre algorithme propriétaire IADRC est 40,00 % meilleur que l'IADRC de la réf. [34], 68,24 % meilleur que l'ADRC traditionnel, 64,00 % meilleur que SMC et 37,21 % meilleur que le PID flou en termes de rapidité. En termes de précision, il est 49,25 % meilleur que le IADRC dans la réf. [34], 73,72 % meilleur que l'ADRC traditionnel, 92,62 % meilleur que le SMC et 3,35 % moins bon que le PID flou. De plus, lorsque le couple de charge échelonné est

Machine Translated by Google

appliqué dans l'état de fonctionnement stable, l'algorithme IADRC proposé dans cet article est 33,33 % meilleur que l'IADRC dans la réf. [34], 88,24 % meilleur que l'ADRC traditionnel, 85,71 % meilleur que SMC et 94,29 % meilleur que le PID flou en termes de rapidité. En termes de précision, il est 64,35 % meilleur que le IADRC dans la réf. [34], 75,24 % meilleur que l'ADRC traditionnel, 90,99 % meilleur que SMC et 59,19 % meilleur que le PID flou. De plus, des tests expérimentaux ajoutant du bruit gaussien et changeant la résistance du moteur attestent que l'algorithme IADRC proposé a une bonne robustesse.

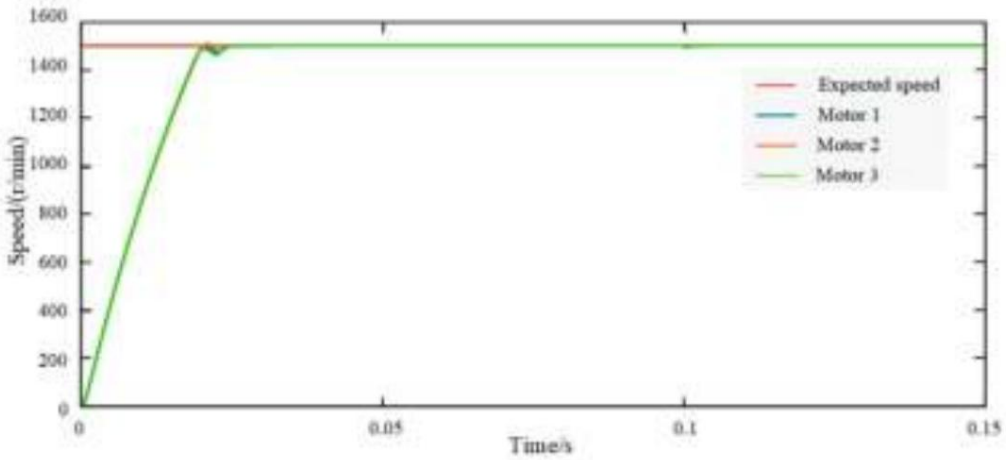


Figure 9. Courbes de vitesse du moteur avec différentes résistances.

5. Conclusions

Une stratégie IADRC raffinée basée sur la fonction fal est expliquée dans cet article, et une meilleure performance de contrôle pour le PMSM est obtenue par rapport à l'ADRC traditionnelle, IADRC dans la réf. [34], SMC et PID flou. Les résultats de simulation indiquent que par rapport à l'ADRC, l'IADRC dans la réf. [34], SMC et PID flou, l'IADRC proposé dans cet article a une vitesse de réponse plus rapide. Le temps pour atteindre et se stabiliser à la vitesse attendue est 68,24 % plus court que celui de l'ADRC, 40,00 % plus court que celui de l'IADRC dans la réf. [34], 64,00 % plus court que celui du SMC et 37,21 % plus court que celui du PID flou. De plus, l'IADRC proposé dans cet article n'a pas de dépassement et la réduction d'erreur maximale s'élève à 73,72 % par rapport à l'ADRC, 49,25 % par rapport à l'IADRC dans la réf. [34], 92,62 % par rapport au SMC et −3,35 % par rapport au PID flou. En cas de perturbation soudaine lorsque la vitesse du PMSM est stabilisée à la vitesse attendue, le temps pour atteindre et se stabiliser à la vitesse attendue est 88,24 % plus court que celui de l'ADRC, 33,33 % plus court que celui de l'IADRC dans la réf. [34], 85,71 % plus court que celui du SMC et 94,29 % plus court que celui du PID flou. De plus, l' erreur maximale de l'IADRC proposée dans cet article est inférieure de 75,24 % à celle de l'ADRC, et de 64,35 % inférieure à celle de l'IADRC dans la réf. [34], 90,99 % inférieure à celle du SMC et 59,19 % inférieure à celle du PID flou. En dehors de cela, la bonne robustesse est également vérifiée en ajoutant du bruit gaussien et en modifiant la résistance du moteur.

Nos futurs travaux se concentreront sur l'application de l'algorithme proposé par l'IADRC au contrôle physique des PMSM et continueront à améliorer l'algorithme en fonction de la situation de contrôle réelle.

Contributions de l'auteur : Rédaction – préparation du projet original, ZH ; rédaction – révision et édition, YC ; ressources, SC; supervision, XZ, JX et SW Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine sous le numéro de subvention 52205316 et par la Fondation provinciale des sciences naturelles du Zhejiang de Chine sous le numéro de subvention LTGN24E050002. Et l'APC a été financé par le projet majeur d'innovation scientifique et technologique de Wenzhou en Chine sous le numéro de subvention ZN2022002.

Machine Translated by Google

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article, des demandes complémentaires peuvent être adressées à l'auteur correspondant.

Remerciements : Les auteurs remercient les éditeurs et les relecteurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions perspicaces.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Bologneni, S. ; Tubiana, L. ; Zigliotto, M. Réglage étendu du filtre de Kalman dans les lecteurs PMSM sans capteur. IEEETrans. Ind. 2003, 39, 1741-1747. [Référence croisée]
2. Wallmark, O. ; Harnefors, L. ; Carlson, O. Algorithmes de contrôle pour un lecteur PMSM tolérant aux pannes. IEEETrans. Ind. Électron. 2007, 54, 1973-1980. [Référence croisée]
3. Gashti, A. ; Akbarimajd, A. Conception d'un contrôleur PI anti-enroulement pour le LFC d'un système électrique non linéaire combiné au DSTS d'une centrale nucléaire et d'une liaison HVDC. Electr. Ing. 2020, 102, 793-809. [Référence croisée]
4. Errouissi, R. ; Al-Durra, A. ; Muyeen, SM Validation expérimentale d'un nouveau contrôleur de vitesse PI pour entraînements de moteurs à courant alternatif avec des performances transitoires améliorées. IEEETrans. Système de contrôle. Technologie. 2018, 26, 1414-1421. [Référence croisée]
5. Zaky, M. ; Khater, M. ; Yasin, H. ; Shokralla, S. Estimations de vitesses très faibles et de vitesses nulles des entraînements de moteurs à induction sans capteur. Electr. Système d'alimentation. Rés. 2010, 80, 143-151. [Référence croisée]
6. Shi, R. Amélioration de l'algorithme de contrôle prédictif basé sur le PID d'ordre fractionnaire flou. J. Intell. Système. 2023, 32, 876. [Réf. croisée]
7. Tan, W. ; Han, W. ; Xu, J. State-Space PID : un chaînon manquant entre le contrôle classique et moderne. Accès IEEE 2022, 10, 116540–116553. [Référence croisée]
8. Atalik, G. ; Senturk, S. Cartes de contrôle floues intuitionnistes basées sur une méthode de classement floue intuitionniste pour les TIFN. Informatique douce. 2022, 26, 11403-11407. [Référence croisée]
9. Ma, WW ; Dong, JX Contrôle robuste du mode glissant pour une classe de systèmes non linéaires grâce à un schéma de mode glissant à double couche. J. Franck. Inst. Ing. Appl. Mathématiques. 2023, 360, 10227-10250. [Référence croisée]
10. Zhang, GC; Li, XF ; Xia, YQ ; Lui, S. Contrôle de mode glissant adaptatif pour le modèle Fornasini-Marchesini non linéaire 2D soumis à la quantification et aux abandons de paquets. Int. J. Syst. Sci. 2021, 52, 3001-3012. [Référence croisée]
11. Zhao, J. ; Zhao, T. ; Liu, N. Contrôle de rejet actif des perturbations par ordre fractionnaire avec auto-réglage flou pour une plate-forme stabilisée avec précision. Entropie 2022, 24, 1681. [CrossRef] [Pub Med]
12. Xiang, CD ; Petersen, IR; Dong, DY Contrôle H∞ robuste et cohérent de systèmes quantiques linéaires incertains avec direct et indirect accouplements. J. Frankl. Inst. Ing. Appl. Mathématiques. 2023, 360, 13845-13869. [Référence croisée]
13. Han, J. Du PID au contrôle actif du rejet des perturbations. Trans. Ind. Électron. 2009, 56, 900-906. [Référence croisée]
14. Liu, JJ; Chen, H. ; Wang, L. ; Yu, MY Contrôle actif du rejet des perturbations pour un modèle de profondeur amélioré de l'AUV. Appl. Mécanique. Maître. 2014, 687, 157-162. [Référence croisée]
15. Meng, Y. ; Liu, B. ; Wang, L. Contrôle de vitesse du PMSM basé sur un contrôleur ADRC optimisé. Mathématiques. Problème. Ing. 2019, 2019, 18. [Référence croisée]
16. Xiong, S. ; Xie, H. ; Chanson, K. ; Zhang, G. Une méthode de suivi de la vitesse pour la conduite autonome via ADRC avec observateur d'état étendu. Appl. Sci. 2019, 9, 3339. [Réf. croisée]
17. Wan, J. ; Liu, H. ; Yuan, J. ; Shen, Y. ; Zhang, H. ; Wang, H. ; Zheng, Y. Contrôle de mouvement d'un véhicule sous-marin autonome basé sur Rejet de perturbation active du calcul fractionnaire. J. Mar. Sci. Ing. 2021, 9, 1306. [CrossRef]
18. Yang, Z. ; Qian, C. ; Soleil, X. ; Wang, K. Stratégie ADRC linéaire améliorée pour le contrôle sans capteur de l'IPMSM en tenant compte des Facteurs de couplage. IEEETrans. Transp. Electrif. 2023, 9, 4437-4446. [Référence croisée]
19. Zuo, YF; Zhang, J. ; Liu, C. ; Zhang, T. Conception intégrée pour les systèmes d'asservissement de moteur synchrone à aimant permanent basés sur des contrôle du rejet des perturbations. Trans. Chine Electrotech. Soc. 2016, 31, 51-58. [Référence croisée]
20. Croc, S. ; Meng, J. ; Meng, Y. ; Wang, Y. ; Huang, D. Contrôle du courant de rejet des perturbations actives à temps discret du moteur PM à Faible vitesse utilisant le mode coulissant résonant. IEEETrans. Transp. Electrif. 2023, 9, 4783-4794. [Référence croisée]
21. Li, Z. ; Zhang, Z. ; Wang, J. ; Wang, S. ; Chen, X. ; Sun, H. Système de contrôle ADRC de PMLSM basé sur un nouvel observateur de mode coulissant de terminal non singulier . Énergies 2022, 15, 3720. [CrossRef]
22. Ge, X. ; Sun, K. Contrôle optimal d'un vaisseau spatial avec des panneaux solaires déployables à l'aide d'un algorithme d'optimisation d'essaim de particules. Sci. Technologie chinoise. Sci. 2011, 54, 1107-1112. [Référence croisée]
23. Lamraoui, HC ; Qidan, Z. Contrôle de suivi de vitesse d'un robot mobile de type monocycle basé sur LADRC. Dans Actes de la 3e Conférence internationale de l'IEEE 2017 sur la science du contrôle et l'ingénierie des systèmes (ICCSSE), Pékin, Chine, 17-19 août 2017 ; pp. 200-204. [Référence croisée]
24. Partovibakhsh, M. ; Liu, G. Estimation du taux de glissement et contrôle d'un robot mobile à roues sur différents terrains. Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2015 sur la cybertechnologie dans l'automatisation, le contrôle et les systèmes intelligents (CYBER), Shenyang, Chine, 8-12 juin 2015 ; pp. 566-571. [Référence croisée]
25. Ding, L. ; Gao, HB ; Deng, Z.-Q.; Li, Z. ; Xia, KR ; Duan, G.-R. Contrôle de suivi de trajectoire de robots d'exploration planétaire à roues se déplacer sur un terrain accidenté et déformable. Sci. Monde J. 2014, 2014, 793526. [CrossRef] [Pub Med]
26. Feng, H. ; Guo, B.-Z. Contrôle actif du rejet des perturbations : anciens et nouveaux résultats. Ann. Rév.Contrôle 2017, 44, 238-248. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

27. Lv, C. ; Wang, B. ; Chen, J. ; Zhang, R. ; Dong, H. ; Wan, S. Recherche sur une méthode de suppression des ondulations de couple pour le contrôle du rejet des perturbations actives floues pour un moteur synchrone à aimant permanent. Électronique 2024, 13, 1280. [CrossRef]
28. Wang, X. ; Zhu, H. Contrôle actif du rejet des perturbations du moteur synchrone à aimant permanent sans roulement basé sur un algorithme génétique et une méthode d'ajustement dynamique des paramètres du réseau neuronal. Électronique 2023, 12, 1455. [CrossRef]
29. Croc, Q. ; Zhou, Y. ; Maman, S. ; Zhang, C. ; Wang, Y. ; Huangfu, H. Technologie de servocommande d'actionneur électromécanique basée sur Contrôle actif du rejet des perturbations. Électronique 2023, 12, 1934. [CrossRef]
30. Soleil, C. ; Liu, M. ; Liu, C. ; Feng, X. ; Wu, H. Une méthode de contrôle de drone industriel à quatre rotors basée sur un actif linéaire adaptatif flou Contrôle du rejet des perturbations. Électronique 2021, 10, 376. [CrossRef]
31. Stumberger, B. ; Stumberger, G. ; Hadžiselimovic, M. ; Hamler, A. ; Gorican, V. ; Jesenik, M. ; Trlep, M. Comparaison de la capacité de couple des moteurs synchrones triphasés à aimants permanents avec différentes dispositions à aimants permanents. J. Magn. Magné. Maître. 2007, 316, e261-e264. [Référence croisée]
32. Zhang, XG ; Croc, SJ ; Zhang, H. Contrôle prédictif de modèle robuste et fort basé sur la compensation prédictive des erreurs de courant pour Systèmes d'entraînement PMSM. IEEETrans. Ind. Électron. 2024, 1-10. [Référence croisée]
33. Vitor, ALO; Scalassara, PR ; Goedtel, A. ; Endo, W. Modèles basés sur les transformations de Clarke et Park des coefficients d'ondelettes pour Classification des défauts des machines électriques. J. Contrôle automatique. Electr. Système. 2023, 34, 230-245. [Référence croisée]
34. Xu, P. Recherche sur le système de contrôle de vitesse PMSM des véhicules à moteur miniers basé sur l'auto-immunité floue. Mémoire de maîtrise, Anhui Université de technologie, Anhui, Chine, 2022.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Enquêter et atténuer le compromis performance-équité via l'échantillonnage de catégories protégées

Gédéon Popoola et John Sheppard *

Gianforte School of Computing, Montana State University, Bozeman, MT 59717, États-Unis ;
gideon.popoola@student.montana.edu *
Correspondance : john.sheppard@montana.edu

Résumé : Les algorithmes d'apprentissage automatique sont devenus courants dans la prise de décision quotidienne, et les systèmes d'aide à la décision sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Par conséquent, les recherches sur la prévention et l'atténuation des biais potentiels et de l'injustice des prédictions faites par ces algorithmes se sont multipliées ces dernières années. La plupart des recherches sur l'équité et l'atténuation des biais dans l'apprentissage automatique traitent souvent chaque variable protégée séparément, mais en réalité, il est possible qu'une personne appartienne à plusieurs catégories protégées. Par conséquent, dans ce travail, la combinaison d'un ensemble de variables protégées et la génération de nouvelles colonnes séparant ces variables protégées en de nombreuses sous-catégories ont été examinées.
Ces nouvelles sous-catégories ont tendance à être extrêmement déséquilibrées, c'est pourquoi l'atténuation des biais a été abordée comme un problème de classification déséquilibrée. Plus précisément, quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage personnalisées ont été développées et étudiées pour échantillonner ces nouvelles sous-catégories. Ces nouvelles méthodes d'échantillonnage sont appelées suréchantillonnage de catégorie protégée, échantillonnage proportionnel de catégorie protégée, technique de suréchantillonnage synthétique minoritaire de catégorie protégée (PC-SMOTE) et échantillonnage synthétique adaptatif de catégorie protégée (PC-ADASYN). Ces méthodes d'échantillonnage modifient la méthode d'échantillonnage existante en concentrant leur échantillonnage sur les nouvelles sous-catégories plutôt que sur l'étiquette de classe. L'impact de ces stratégies d'échantillonnage a ensuite été évalué sur la base des performances classiques et de l'équité dans les contextes de classifica
Les performances de classification ont été mesurées à l'aide de l'exactitude et de F1 sur la base d'arbres de décision univariés d'entraînement, et l'équité a été mesurée à l'aide de différences impaires égalisées et de parité statistique. Pour évaluer l'impact de l'équité par rapport à la performance, ces mesures ont été évaluées par rapport à la profondeur de l'arbre de décision. Les résultats montrent que les méthodes proposées ont pu déterminer les points optimaux, grâce auxquels l'équité a été augmentée sans diminuer les performances, atténuant ainsi tout compromis potentiel entre performances et équité.

Mots-clés : équité ; catégories protégées; apprentissage automatique ; échantillonnage

check for updates

Citation : Popoola, G. ; Sheppard, J. Enquêter et atténuer les Compromis performance-équité via Échantillonnage de catégorie protégée. Électronique 2024, 13, 3024. https://doi.org/10.3390/electronics13153024

Rédacteurs académiques : Niusha Shafiabady et Jianlong Zhou

Reçu : 11 juin 2024
Révisé : 23 juillet 2024
Accepté : 24 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Alors que les algorithmes d'apprentissage automatique (ML) dominent de plus en plus les systèmes de prise de décision et d'aide à la décision, leur déploiement généralisé dans divers secteurs soulève des questions urgentes quant à l'équité et à la transparence de leurs prédictions [1]. Le potentiel de ces algorithmes à perpétuer ou à exacerber les préjugés sociétaux existants a donné naissance à un nombre important de recherches visant à enquêter et à atténuer l'injustice algorithmique. Ceci est essentiel car les décisions influencées par ces algorithmes ont un impact profond sur les individus, affectant les résultats dans des domaines allant de la finance et de l'emploi à la justice pénale et aux soins de santé [2].

La source d'injustice et de biais dans le ML a de multiples facettes [3]. En particulier, il est possible que l'injustice provienne directement des algorithmes de ML eux-mêmes en raison d'un éventuel désalignement du biais inductif sous-jacent des algorithmes par rapport au concept cible et à la distribution des données. C'est ce qu'on appelle le biais algorithmique. Une autre préoccupation réside dans le biais potentiel résidant dans les données utilisées pour former les modèles où, en conséquence directe de l' hypothèse typique « indépendante et distribuée à l'identique » (IID) utilisée dans la plu

Machine Translated by Google

méthodes, le résultat de l'apprentissage est de propager le biais dans les prédictions de telle sorte qu'ils correspondent au biais dans les données sous-jacentes elles-mêmes. C'est cette dernière situation qui constitue ici le centre de notre travail.

1.1. Biais et injustice dans l'apprentissage automatique

Le biais est le traitement préjudiciable, injuste ou inégal d'un individu ou d'un groupe sur la base de caractéristiques spécifiques, souvent appelées caractéristiques sensibles ou protégées [4]. Des exemples de ces caractéristiques protégées incluent l'âge, la race, le handicap, le sexe et le genre [5]. Les biais dans le ML peuvent être grossièrement divisés en traitement disparate (injustice directe) et traitement d'impact (injustice indirecte) [6]. Une injustice directe se produit lorsque des éléments protégés sont utilisés explicitement dans la prise de décisions. L'injustice indirecte est devenue de plus en plus courante aujourd'hui. Ce type d'injustice n'utilise pas explicitement les attributs protégés ; au lieu de cela, cela se produit lorsque le recours à des variables associées à ces attributs aboutit à des résultats significativement différents pour les groupes protégés. Ces autres variables sont appelées fonctionnalités proxy. Des exemples de préjugés concrets incluent la pratique historique américaine de « redlining », où les prêts hypothécaires immobiliers ont été refusés aux résidents de codes postaux majoritairement habités par des minorités, les préjugés sexistes dans le processus d'embauche d'Amazon, les préjugés raciaux des distributeurs de savon de Google, etc. [7].

Bien que ces outils d'aide à la décision aident à automatiser le processus de prise de décision, ces outils peuvent entraîner un traitement injuste des individus ou des groupes, directement ou indirectement [8]. Une injustice peut survenir dans plusieurs domaines de la modélisation, comme dans l' ensemble de données d'entraînement. Cela peut se produire lorsque l'ensemble de données de formation ne fournit pas une représentation équitable des catégories protégées, de sorte que la « vérité terrain » devient difficile à déterminer. Par exemple, considérons un ensemble de données provenant d'une entreprise dans laquelle un groupe spécifique a toujours été victime de discrimination. Supposons plus précisément que les employées féminines de cette entreprise n'aient pas été promues au même titre que leurs homologues masculins, qui, en revanche, ont connu une évolution de carrière, même si les deux groupes ont atteint le même niveau. Dans cette situation, la véritable valeur des contributions des salariées féminines – la vérité terrain – n'est pas visible. En conséquence, un algorithme de ML entraîné sur ces données est susceptible de détecter et d'intégrer ce biais, perpétuant ainsi les préjugés existants. Cela pourrait amener l'algorithme à prendre des décisions discriminatoires, par exemple en recommandant des candidats masculins à l'embauche ou à une promotion plus fréquemment que des candidates féminines tout aussi qualifiées ou plus qualifiées.

Un autre domaine dans lequel une injustice peut survenir est celui de l'algorithme ML lui-même [9]. Les algorithmes de ML peuvent toujours produire des décisions discriminatoires, même lorsqu'ils sont formés sur un ensemble de données impartial où la « vérité terrain » est représentée avec précision. Cette situation se produit lorsque les erreurs du système affectent de manière disproportionnée les individus d'un groupe ou d'une minorité spécifique. Par exemple, considérons un algorithme de détection du cancer du sein qui présente des taux de faux négatifs significativement plus élevés pour les individus noirs que pour les individus blancs, ce qui signifie qu'il ne parvient pas à identifier le cancer du sein plus fréquemment chez les patientes noires que chez les patientes blanches. Si cet algorithme est utilisé pour éclairer les recommandations de traitement, il déconseillerait à tort le traitement à un plus grand nombre d'individus noirs que de blancs, ce qui entraînerait des disparités raciales dans les résultats des soins de santé. Cela souligne la nécessité cruciale de garantir que les algorithmes fonctionnent de manière équitable dans tous les groupes en termes de données d'entraînement et de la manière dont leurs erreurs affectent différentes populations. Les résultats de la littérature antérieure ont rapporté plusieurs cas d'algorithmes entraînant un traitement injuste, par exemple, redlining et profilage racial [10], discrimination hypothécaire [11], emploi et sélection du personnel [12].

Alors que des efforts considérables ont été consacrés à la lutte contre les biais dans les prédictions de ML [13, 14], une grande partie des recherches existantes se sont concentrées sur l'atténuation des biais pour des attributs protégés uniques de manière isolée [15]. Par exemple, sur un ensemble de données avec deux attributs protégés, la race et le sexe, la plupart des approches existantes peuvent apprendre soit un modèle équitable impliquant la race, soit un modèle équitable impliquant le sexe mais pas un modèle équitable impliquant à la fois la race et le sexe [7]. Cependant, les identités du monde réel ne sont pas singulières ; ils sont complexes et multiformes, les individus appartenant souvent simultanément à plusieurs groupes protégés [16]. Par exemple, une personne peut être victime simultanément de discrimination sur la base de plusieurs attributs protégés tels que l'âge, la race et le sexe. Cette intersectionnalité peut conduire à des formes aggravées de biais et

Machine Translated by Google

discrimination, qui ne sont pas traitées de manière adéquate par des interventions d'équité à variable unique. Il est donc essentiel de développer des méthodologies qui abordent de manière holistique la nature multidimensionnelle des identités personnelles. Ce projet cherche à combler cette lacune en considérant des combinaisons de catégories protégées, synthétisant ainsi ces catégories protégées en groupes multicatégories complets, et vise à aborder plus efficacement les complexités des biais en utilisant de nouvelles méthodes d'échantillonnage de catégories protégées, reconnaissant et abordant ainsi la nature multiforme. des identités personnelles et des préjugés potentiels.

Les travaux présentés dans cet article sont motivés par le problème de l'utilisation d'algorithmes de ML pour la prise de décision dans des domaines socialement sensibles tels que l'évaluation des prêts, l'embauche ou l'évaluation des prêts hypothécaires, en travaillant avec cette situation où un individu peut appartenir à plusieurs catégories protégées. Étant donné un ensemble de données d'entraînement étiqueté contenant deux ou plusieurs caractéristiques protégées, la méthode proposée combine ces attributs protégés puis les divise en nouvelles multicatégories. Ces nouvelles catégories sont susceptibles d'être extrêmement déséquilibrées et doivent être équilibrées pour améliorer l'équité de la prédiction de nos algorithmes ML. Les méthodes d'échantillonnage populaires telles que le suréchantillonnage [17], la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques (SMOTE) [18], l'échantillonnage synthétique adaptatif (ADASYN) [19], etc., échantillonnent les données sur plusieurs étiquettes de classe, ce qui ne correspond pas à l'objectif de notre recherche d'échantillonnage à travers les nouvelles multicatégories. Par conséquent, une nouvelle classe de modifications de ces méthodes d'échantillonnage est proposée, capable d'échantillonner à travers la nouvelle catégorie plutôt que les étiquettes de classe. Cette nouvelle classe d' échantillonnage modifié est appelée échantillonnage de catégorie protégée. Les méthodes d'échantillonnage des catégories protégées proposées qui en résultent sont utilisées pour échantillonner et équilibrer les nouvelles catégories avant d'effectuer la classification. La nouveauté de ce travail est double. Premièrement, l'approche proposée combine les catégories protégées pour former de nouvelles multicatégories qui imitent l'identité de l'être humain dans le monde réel. La seconde est la modification des méthodes d'échantillonnage existantes pour se conformer à l'échantillonnage de ces nouvelles catégories afin de s'assurer que toutes les nouvelles catégories ont le même nombre d

À des fins de démonstration uniquement, un arbre de décision univarié a été choisi comme algorithme de classification. L'objectif est de démontrer les effets des différentes méthodes d'échantillonnage sur les performances, en espérant que des tendances similaires se manifesteront quelle que soit la méthode d'apprentissage sous-jacente. La méthode d'échantillonnage proposée a été comparée à la référence (données non échantillonnées) en utilisant l'exactitude et F1 comme mesures de performance de classification, ainsi que les différences de cotes égalisées et la parité statistique comme mesures d'équité. En outre, plusieurs analyses ont été effectuées pour montrer comment la profondeur maximale de l'arbre de décision affecte à la fois l'exactitude et l'équité.

1.2. Question de

recherche Partant de l'observation empirique selon laquelle un compromis existe parfois entre l'équité et les performances du ML [20], cette recherche tente de répondre à plusieurs questions, telles que la manière dont ce compromis pourrait être atténué. En particulier, nous cherchons à déterminer si la méthode d'échantillonnage des catégories protégées pour lutter contre l'équité peut atténuer ce compromis. De plus, pouvons-nous développer un cadre méthodologique qui atténue efficacement les biais entre ces variables protégées combinées sans compromettre la précision prédictive des modèles ML ? Enfin, nous prévoyons de répondre à la question de savoir comment la profondeur d'un arbre de décision affecte à la fois les mesures d'exactitude et d'équité, explorant ainsi la relation entre le niveau d'ajustement (du sous-apprentissage au surapprentissage) et l'équité.

1.3. Hypothèse

Nous émettons l'hypothèse qu'en employant des techniques sophistiquées d'échantillonnage de catégories protégées conçues pour ces groupes multicatégories nouvellement formulés, nous pouvons augmenter considérablement l'équité du modèle en termes de différences de cotes égalisées sans diminuer les performances de classification en termes de précision et de F1. En outre, nous explorons l'équilibre délicat entre équité et exactitude, en émettant l'hypothèse qu'il est possible d'identifier les points stratégiques où l'équité peut être maximisée sans impact négatif sur la performance.

Cette recherche remet en question les affirmations existantes selon lesquelles il existe des compromis en matière d'équité et de ML.

Machine Translated by Google

prédiction. Il ouvre la voie à de futures explorations de la nature multidimensionnelle de l'identité et de la discrimination dans les systèmes de décision automatisés.

1.4. Contributions

Le vaste problème de l'équité dans l'apprentissage automatique est important dans la mesure où la prévalence des systèmes d'IA et de ML a aujourd'hui un impact majeur sur la vie et les moyens de subsistance des gens. Bien que l'attention portée au ML équitable ait considérablement augmenté, il reste nécessaire de trouver des méthodes permettant de faire progresser le ML équitable sans avoir d'impact négatif sur les performances du ML. Basées sur une revue approfondie de la littérature et sur la nécessité de ce type de travail, les méthodes rapportées ici apportent les contributions suivantes : 1.

L'hypothèse communément admise selon laquelle il existe un compromis inhérent entre l'équité et la performance (c'est-à-dire l'exactitude) dans l'apprentissage automatique est remis en question par les preuves fournies pour soutenir ce défi. En particulier, les résultats présentés dans cet article indiquent qu'un tel compromis peut être atténué, ce qui suggère que tout compromis est très probablement lié à la manière dont les données sont gérées.

2. Quatre nouvelles méthodes de prétraitement pour l'échantillonnage des données sont présentées, basées sur l'application d'une stratégie d'échantillonnage multicatégorie utilisant des données capturées dans des catégories protégées. Les méthodes partent de l'hypothèse et de l'hypothèse correspondante selon lesquelles l'équilibrage des données sur la base de ces propriétés multicatégories peut accroître l'équité sans affecter négativement les performances du modèle d'apprentissage automatique.
3. Les résultats expérimentaux sont présentés à l'aide de trois ensembles de données étudiés de manière approfondie au sein de la communauté Fair ML. Les expériences incluent des comparaisons avec des méthodes traditionnelles de formation sans rééchantillonnage pour démontrer les effets relatifs des méthodes proposées. Les résultats démontrent que deux des méthodes proposées, la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques de catégorie protégée (PC-SMOTE) et l'échantillonnage synthétique adaptatif de catégorie protégée (PC-ADASYN), sont particulièrement efficaces pour améliorer à la fois l'équité et les performances.
4. Une analyse détaillée relative aux effets potentiels du sous-ajustement et du surajustement sur l'équité est présentée en examinant différents niveaux dans un modèle d'arbre de décision, avec et sans utilisation des méthodes d'échantillonnage proposées. Les résultats démontrent la capacité des méthodes proposées à identifier un niveau idéal de l'arbre où l'équité et la précision sont maximisées.

Grâce aux contributions ci-dessus, ce travail représente une avancée significative dans la résolution des problèmes d'équité dans l'apprentissage automatique. L'un des principaux enseignements des méthodes et des résultats présentés ici est que l'équité peut être assurée sans compromettre les performances du modèle.

1.5. Organisation

Cet article est organisé comme suit. Dans la section 2, une explication détaillée de l'équité et une discussion de plusieurs mesures techniques d'équité sont présentées. Ensuite, dans la section 3, la littérature antérieure relative aux stratégies d'atténuation des biais est décrite. Dans la section 4, nous décrivons nos techniques d'échantillonnage proposées, notre ensemble de données et notre approche du réglage des hyperparamètres. Dans la section 5, nous présentons les résultats de plusieurs expériences ainsi que des tests d'hypothèses statistiques comme moyen de valider ces résultats. Dans la section 6, les résultats expérimentaux sont discutés et les performances de chaque algorithme sur chaque ensemble de données et chaque métrique sont analysées. D'autres résultats sur l'impact de la profondeur des arbres sur l'équité et la précision sont également présentés. Dans la section 7, les limites de ce travail et les orientations correspondantes pour les travaux futurs sont présentées, et la section 8 présente un certain nombre de conclusions.

2. Contexte Cette

étude considère l'équité lors de la prédiction d'un résultat $y \in Y$ à partir d'un ensemble de paramètres tels que $x \in X \subseteq R^d$ et quelques attributs protégés supplémentaires $s \in S \subseteq R^p$ genre et sexe. , que la race, Par exemple, dans la prévision d'un prêt, x représente les antécédents financiers d'un demandeur, s est sa race et son sexe déclarés, et y indique si son prêt est approuvé.

Machine Translated by Google

ou refusé. Un modèle de prédiction est considéré comme équitable si ses erreurs sont réparties uniformément entre les groupes protégés comme les différentes races ou sexes. Les prédictions de classe à partir des données d'entraînement D sont notées Yˆ D := h(x, s) pour certains h : X × S → Y d'une classe H. Les attributs protégés s S dans notre étude sont supposés être binaires avec un paramètre spécial valeur n désignant le groupe non privilégié. Par exemple, S pourrait être la race et n « non-Blanc » ; par conséquent, la nature binaire de S est {w, n} où w représente les candidats blancs, qui constituent le groupe privilégié, et n représente les candidats non blancs, qui constituent le groupe non privilégié. La définition peut être généralisée aux cas non binaires.

X , La discrimination dans les ensembles de données étiquetés peut être définie comme étant donné un ensemble de données D, un ensemble de fonctionnalités et un ensemble d'attributs protégés S avec une valeur de domaine {w, n}. La discrimination en D par rapport au groupe S = n noté diss=n(D) est définie comme

$$\text{diss=n(D)} = \left|\frac{|\{x \quad D : x(s) = w, h(x) = +\}|}{\{x \quad D : x(s) = w\}|} - \frac{|\{x \quad D : x(s) = n, h(x) = +\}| \; |\{x}{D : x(s) = n\}|}\right.$$

La définition ci-dessus peut être traduite par la différence de probabilité qu'un candidat soit dans la classe positive pour chaque domaine d'attributs protégés {w, n}. Notre étude étend la définition ci-dessus en considérant l'ensemble de données D, qui contient deux ou plusieurs attributs protégés.

Deux mesures d'équité populaires sont utilisées. Le premier est la différence impaire égalisée (EOD), qui mesure le degré de discrimination ou d'équité de notre prédiction. EOD déclare qu'un classificateur binaire yˆ est juste si son taux de faux négatifs (FNR) et son taux de vrais positifs (TPR) sont égaux dans le domaine de S [21]. FPR et TPR par rapport à l'attribut protégé s S de valeur n peuvent être définis comme

$$TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n)$$

L'EOD est ensuite défini mathématiquement comme la différence entre TPR et FPR entre différents groupes dans un attribut protégé. C'est,

$$EOD = TPRn(\hat{y}) - FPRn(\hat{y}).$$

Un classificateur équitable a un EOD de 0, tandis qu'un classificateur injuste a un EOD de 1. Bien qu'il soit presque impossible d'obtenir un classificateur totalement équitable en pratique, cette recherche vise à améliorer l'EOD sans diminuer la précision. Ensuite, pour l'EOD,

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n) = TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

et

$$FPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w) = TPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w)$$

Pour étendre la définition EOD ci-dessus à notre multicatégorie, l'EOD est calculé pour chaque colonne, puis la macromoyenne de l'EOD est présentée comme l'EOD finale. La deuxième métrique utilisée pour mesurer l'équité dans la prédiction ML est la parité statistique (SP). SP définit l'équité comme une probabilité égale d'être classé comme positif [22]. Cela peut être interprété comme chaque groupe d'un attribut protégé ayant la même probabilité d'être classé avec un résultat positif.

$$P(\hat{y} = 1|S = w) = P(\hat{y} = 1|S = n)$$

3. Revue de la littérature

Les algorithmes de ML, de plus en plus utilisés pour la prise de décision dans des applications critiques telles que la récidive, la notation de crédit, les décisions de prêt, etc., pourraient initialement être considérés comme équitables et exempts de biais inhérents. Cependant, en réalité, ils peuvent hériter de tout biais ou discrimination présent dans les données sur lesquelles ils sont formés, comme le note Burt [23]. De plus, la simple suppression des variables protégées de l'ensemble de données ne suffit pas pour lutter contre la discrimination indir

Machine Translated by Google

pourrait, en fait, le cacher. Cette reconnaissance a accru le besoin d' outils plus avancés, faisant de la découverte et de la prévention de la discrimination un domaine de recherche important, comme le soulignent [24-27].

Les biais dans le ML sont un sujet en pleine croissance dans la communauté de recherche sur l'apprentissage automatique. Les biais d'un modèle ML peuvent conduire à un traitement injuste des personnes appartenant à certains groupes protégés. Dernièrement, les leaders industriels ont commencé à mettre de plus en plus l'accent sur les biais dans les modèles et logiciels de ML. L'Institute for Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [28], Microsoft [29] et l'Union européenne [30] ont récemment publié des principes pour guider une conduite équitable en matière d'IA. Ces organisations ont déclaré que les modèles ML doivent être équitables dans les applications du monde réel . Les stratégies d'atténuation des biais impliquent de modifier un ou plusieurs des éléments suivants pour garantir que les prédictions faites par l'algorithme ML sont moins biaisées : (a) les données d'entraînement, (b) l'algorithme ML et (c) les prédictions qui en résultent elles-mêmes. Celles-ci sont respectivement classées en approches de prétraitement [31], d'inprocessing [32] et de post-traitement [21].

Premièrement, les données de formation peuvent être prétraitées pour réduire les injustices ou les biais avant de former le modèle. Kamiran et Calders [6] suggèrent d'échantillonner ou de repondérer les données pour neutraliser la discrimination. Cette approche peut ajuster la représentation ou l'importance de certains points de données pour favoriser (ou réduire la faveur) une classe par rapport à une autre. Une autre méthode consiste à modifier directement les enregistrements de données individuelles pour réduire la discrimination, comme l'explorent [33]. Par exemple, cette approche consiste à modifier les valeurs d'un ensemble de données pour réduire les préjugés identifiables à l'encontre de certains groupes. De plus, le concept de proximité t, introduit par Sondeck et al. [34], est appliqué au contrôle de discrimination dans les travaux de [35]. L'utilisation de la proximité t garantit que la distribution des attributs sensibles dans un groupe donné est proche de la distribution de l' attribut dans l'ensemble de données, préservant ainsi la confidentialité et empêchant la discrimination basée sur des attributs sensibles. Un fil conducteur entre ces approches consiste à équilibrer le contrôle de la discrimination avec l'utilité des données traitées, c'est-à-dire minimiser les biais sans compromettre de manière significative l'exactitude, la représentativité et l'utilité globale des données pour la modélisation ou l'analyse prédictive. Cet équilibre est essentiel pour garantir que les efforts visant à promouvoir l'équité ne réduisent pas par inadvertance la qualité ou l'applicabilité des données.

Dans l'ensemble, la méthode de prétraitement peut être divisée en trois catégories : (1) modification des données, (2) suppression des données et (3) rééchantillonnage des données. Les méthodes de la première catégorie visent à modifier les valeurs des points de données d'entraînement (y compris les valeurs d'attributs protégés, les valeurs de classe et les valeurs de caractéristiques) afin de réduire le biais dans l'ensemble de données. Un exemple de cette méthode est le massage de données proposé par [15]. Leur approche classe les données de formation et les données proches de la limite de décision dans les groupes privilégiés et non privilégiés sont inversées. Alternativement, une méthode de prétraitement optimisée qui apprend une transformation probabiliste qui modifie les classes et les caractéristiques avec une distorsion individuelle et une équité de groupe a été proposée par Fahse et al. [23]. Dans [36], les valeurs d'attribut d'origine sont remplacées par des valeurs choisies indépendamment de l'étiquette de classe pour former un modèle atteignant à peu près des chances égalisées. De même, Peng et al. [37] remplacent les valeurs d'attribut protégées par des valeurs prédites sur la base d'autres attributs, similaires à l'imputation de données.

Les méthodes de la deuxième catégorie visent à former un modèle équitable en supprimant certaines fonctionnalités de l'ensemble de formation. Un exemple de cette méthode est la suppression des données proposée par Dhar et al. [38]. Dans leur article, les attributs et caractéristiques protégés qui sont fortement corrélés aux attributs protégés, également appelés attributs proxy, sont supprimés de l' ensemble de données pour former un modèle équitable.

Les méthodes de la troisième catégorie visent à former un modèle équitable soit en ajustant les poids d'échantillonnage, soit en suréchantillonnant l'ensemble de données. Par exemple, Krasanakis et al. [39] ont proposé une méthode de repondération qui adapte de manière itérative les poids des échantillons d'entraînement avec un modèle théoriquement fondé pour atténuer le compromis biais-précision. Dans [40], Chakraborty et al. a proposé FairSMOTE comme méthode pour suréchantillonner les points de formation de groupes minoritaires avec des points de données artificiels basés sur la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques (SMOTE) [18], afin d'obtenir des distributions de classes équilibrées. De plus, Yan et al. [41] ont proposé de suréchantillonner les données de formation des groupes minoritaires avec des points de données artificiels pour obtenir une répartition équilibrée des

Machine Translated by Google

tion. Contrairement à FairSMOTE, les auteurs se sont concentrés sur des scénarios dans lesquels les attributs protégés sont inconnus et ont appliqué une méthode de regroupement pour identifier différents groupes démographiques.

L'inprocessing implique des méthodes qui modifient la façon dont un modèle ML est formé afin de réduire les biais. Dans [42], une approche de débiaisation contradictoire a été proposée. Cette approche apprend un classificateur pour augmenter la précision et l'équité de la prédiction en incluant une variable pour le groupe intéressé en apprenant simultanément un prédicteur et un adversaire. Cela conduit à la génération d'un classificateur impartial car les prédictions ne contiennent aucune information de discrimination de groupe que l'adversaire pourrait utiliser. Alternativement, un algorithme qui prend une métrique d'équité dans le cadre de la fonction de perte et renvoie un modèle formé pour cette métrique d'équité a été proposé dans [43]. Kamishima et coll. [22] ont proposé une méthode de régularisation, qui incluait un terme de pénalité dans la fonction de perte d'un classificateur pour produire une prédiction impartiale. Zafar et coll. [44] ont développé une nouvelle méthode de pondération par laquelle ils ajustent le poids de l'échantillon pour chaque donnée de formation afin d'atteindre un objectif d'équité spécifique, tel que des cotes égalisées sur les données de validation. Récemment, l'atténuation des biais a été abordée comme un problème d'optimisation sous contrainte en ajoutant une contrainte d'équité et en optimisant la perte pour qu'elle soit cohérente avec cette contrainte [45,46]. De plus, certains travaux modifient les réseaux de neurones en utilisant le dropout pour supprimer les neurones appartenant à des attributs pr

Les méthodes de post-traitement atténuent les biais après l'ajustement d'un modèle ML et incluent des approches telles que le calibrage, l'optimisation des contraintes et le seuillage de transformation [6]. De telles méthodes proposent un algorithme qui donne des résultats favorables aux groupes non privilégiés et des résultats défavorables aux groupes favorables dans un intervalle de confiance donné autour de la limite de décision présentant la plus grande incertitude. Par exemple, une approche modifie les seuils maximaux du classificateur pour produire un objectif spécifié d'égalité des chances ou de cotes égalisées. Une autre approche consiste à muter aléatoirement les classes de certaines prédictions en différentes classes [48].

Plusieurs nouvelles études [49,50] ont combiné soit le prétraitement, soit le traitement interne, soit le post-traitement pour former une méthode d'ensemble. Par exemple, Bhaskaruni et al. [50] combinent le suréchantillonnage de la classe protégée contre le déséquilibre avec une frontière de décision déplaçant une méthode de post-traitement pour résoudre le problème d'injustice.

Les chercheurs se sont penchés sur divers concepts de discrimination et d'équité dans le cadre de la prise de décision algorithmique. L'impact disparate (appelé auparavant équité indirecte), par exemple, est mesuré par la parité statistique et l'équité de groupe, comme l'expliquent Bhaskaruni et al. [50]. D'un autre côté, le concept d'équité individuelle, également introduit par Bhaskaruni et al., souligne que des individus similaires doivent être traités de la même manière, quelle que soit leur appartenance à un groupe. Cette approche se concentre sur l'équité au niveau individuel , garantissant que les décisions sont prises sur la base d'attributs pertinents plutôt que de stéréotypes ou de préjugés de groupe .

Dans les classificateurs et autres modèles prédictifs, atteindre des taux d'erreur égaux entre différents groupes est un objectif clé, comme le soulignent Zhang et Neill [16]. De même, garantir le calage ou l'absence de biais prédictif dans les prédictions, comme discuté par Hardt et al. [21], est cruciale. Cependant, la tension entre ces notions – calibrage et taux d'erreur égaux – est explorée par Dwork et al. [51] et Pleiss et al. [52], indiquant que satisfaire simultanément les deux peut être un défi. Karimi-Haghighi et Castillo [53] présentent des travaux connexes explorant les complexités inhérentes à la réalisation de l'équité algorithmique. Friedler et coll. [54] examine en outre les compromis nécessaires pour répondre à diverses définitions algorithmiques de l'équité, en particulier du point de vue de la sécurité publique. Étant donné que nos travaux se concentrent sur le prétraitement plutôt que sur la modélisation, des considérations telles que les taux d'erreur équilibrés et le biais prédictif deviennent moins directement applicables.

Sur la base de notre examen de diverses méthodes de prétraitement, il semble qu'aucun travail n'ait été mené pour tenter de modéliser l'équité pour deux ou plusieurs attributs protégés simultanément. En outre, la méthode d'échantillonnage utilisée dans les travaux antérieurs se concentrait uniquement sur l'échantillonnage basé sur les étiquettes de classe plutôt que sur les catégories protégées. Par conséquent, dans cet article, l'accent est mis sur le prétraitement car il représente l'aspect le plus adaptable du pipeline de science des données [55]. Le prétraitement se distingue par le fait qu'il ne dépend pas du choix de l'algorithme de modélisation et peut être exécuté de manière transparente.

Machine Translated by Google

intégrés aux mécanismes de diffusion et de publication des données. Cette indépendance et cette flexibilité rendent le prétraitement essentiel pour garantir la qualité et l'équité des données avant toute modélisation analytique ou prédictive. Enfin, nous nous concentrons sur de nouvelles méthodes d'échantillonnage personnalisées qui échantillonnent la catégorie protégée dans la formation des données pour construire un modèle équitable.

4. Méthodologie

L'objectif de notre travail est d'explorer des méthodes d'échantillonnage pour améliorer l'équité dans le ML sans que les performances de prédiction correspondantes en souffrent, atténuant ainsi le compromis équité-performance . En conséquence, quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage axées sur la réalisation de cet objectif sont proposées. Ces méthodes d'échantillonnage résolvent le problème de classe déséquilibrée posé par la nouvelle multicatégorie générée en raison de la combinaison des catégories protégées. Des méthodes d'échantillonnage personnalisées sont nécessaires car les méthodes existantes échantillonnent les données en fonction des classes minoritaires et majoritaires, mais par souci d'équité, les nouvelles multicatégories sont échantillonnées de manière égale. Cela nécessite à son tour de modifier les méthodes d'échantillonnage existantes pour échantillonner les données en fonction de ces nouvelles catégories. Cela conduit à quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage : le suréchantillonnage de catégorie protégée, l'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée, le SMOTE de catégorie protégée (PC- SMOTE) et l'ADASYN de catégorie protégée (PC-ADASYN).

4.1. Suréchantillonnage de catégories

protégées Dans le suréchantillonnage de catégories protégées, la première étape consiste à combiner les catégories protégées dans l'ensemble de données et à coder la combinaison pour produire notre nouvelle multicatégorie. Par exemple, dans l'ensemble de données sur le revenu des adultes, l'âge (jeunes et adultes), la race (blancs et autres) et le sexe (hommes et femmes) sont combinés pour générer huit nouvelles catégories, qui deviennent ADULTWHITEMALE, ADULTOTHERSMALE, YOUNGWHITEMALE, YOUNGOTHERSMAIL, ADULTWHITEFEMALE, ADULTOTHERSFEMALE, YOUNGWHITEFEMALE et YOUNGOTHERSFEMALE, respectivemer Ces nouvelles catégories ont des tailles d'échantillon variables, et l'objectif de notre suréchantillonnage de catégories protégées est d'équilibrer cette nouvelle catégorie de telle sorte que la taille de l'échantillon de chacune des nouvelles catégories corresponde à la taille de la catégorie avec la taille d'échantillon la plus élevée. Pour éviter les fuites de données, l'ensemble de données est séparé en train et test, en appliquant un suréchantillonnage uniquement sur les données de formation, puis en testant sur un ensemble de test non échantillonné.

Le pseudocode de l'algorithme 1 montre en détail notre méthode de suréchantillonnage de catégories protégées. Dans l'algorithme, la catégorie la plus grande a été utilisée comme référence car il s'agit de la catégorie avec la taille d'échantillon la plus élevée. Le processus d'échantillonnage aboutit à de nouvelles données de formation avec une taille d'échantillon équilibrée dans la nouvelle catégorie. L'algorithme fonctionne en échantillonnant le reste des catégories protégées pour correspondre à la taille de l'échantillon de la ligne de base. Cet échantillonnage est effectué en répétant les catégories plusieurs fois avec leurs étiquettes de classe.

4.2. Échantillonnage proportionnel de catégorie protégée

La méthode d'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée est une généralisation du suréchantillonnage de catégorie protégée car le processus commence par la définition d'une taille d'échantillon cible (qui est un hyperparamètre à régler, plutôt que simplement la taille de la plus grande multicatégorie), appelée targetSamples. Cela correspond au nombre souhaité d'instances nécessaires pour chaque catégorie. Cet objectif garantit l'uniformité dans toutes les catégories, atténuant ainsi le risque de biais du modèle en faveur de catégories plus fréquentes. Le résultat typique de l'application de cette méthode est que certaines catégories qui ont plus d'échantillons que targetSamples seront sous-échantillonnées tandis que d'autres seront suréchantillonnées pour en produire une proportion égale dans l' ensemble de données de formation. Le pseudocode de l'algorithme 2 montre étape par étape la méthode d'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée.

Machine Translated by Google

Algorithme 1 : suréchantillonnage de catégorie protégée

```
baselineCount ← somme des entrées dans 'Largest_Category' de Xtrain
totalCount ← nombre d'entrées dans Xtrain
baselineProportion ← baselineCount/totalCount
BalanceData ← initialiser un ensemble de données vide
catégories ← liste des noms de colonnes dans Xtrain commençant par 'combined_category_'
pour chaque catégorie dans les catégories, faites
    CategoryData ← sélectionner les entrées dans Xtrain où catégorie = 1
    CategoryData ← combiner CategoryData avec les étiquettes correspondantes de ytrain
    categoryCount ← nombre d'entrées danscategoryData
    targetCount ← partie entière de totalCount × baselineProportion
    si CategoryCount < targetCount alors
        sampledData ← exemple targetCount decategoryData avec remplacement
        BalancedData ← ajouter sampledData à BalanceData
    autre
        BalancedData ← ajouter CategoryData à BalanceData
fin si
fin pour
retour de données équilibrées
```

Algorithme 2 Échantillonnage proportionnel de catégorie protégée

```
échantillons cibles ← 5 000
sampledBalanced ← initialiser un ensemble de données vide
pour chaque colonne de new_categories.columns , faites
    CategoryRows ← sélectionner les lignes dans new_categories où column = 1
sampledRows ← exemple d'entrées targetSamples decategoryRows avec remplacement
    pour chaque colonne dans oneHotEncodedBalanced.columns , faites
        lignes échantillonnées[col] ← 0
fin pour
    sampledRows[colonne] ← 1
    sampledBalanced ← ajouter sampledRows à sampledBalanced
fin pour
retour sampledBalanced
```

4.3. SMOTE de catégorie protégée

La technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques de catégorie protégée (PC-SMOTE) La méthode d'échantillonnage est un processus plus complexe visant à imiter SMOTE mais modifié pour échantillonner nos nouvelles catégories, plutôt que les étiquettes de classe. Dans cette approche, la première étape consistait à modifier SMOTE pour utiliser un nombre fixe de voisins et sélectionner au hasard un voisin pour l'interpolation plutôt que de faire la moyenne de tous. Le pseudocode de l'algorithme 3 montre la procédure pour le PC-SMOTE. Puisque l'intention de la méthode est de l'utiliser pour le nouveau échantillonnage de catégories, il ne traite pas directement de la génération d'étiquettes de classe. D'où un nouveau une fonction capable de générer une nouvelle étiquette de classe pour les données synthétiques est nécessaire. Pour cela, un nouveau la fonction est définie et génère des étiquettes de classe en fonction du nombre de nouvelles données synthétiques généré et un rapport d'équilibre présélectionné entre les deux classes. L'algorithme 4 montre comment notre nouvelle fonction génère des étiquettes pour nos échantillons synthétiques. L'algorithme détermine d'abord le nombre d'échantillons pour chaque classe en fonction du ratio d'équilibre et génère l'échantillon nécessaire pour chaque classe. Les étiquettes de classe sont le remaniement pour éviter les biais algorithmiques dans le classes générées.

Ces deux algorithmes sont combinés pour former PC-SMOTE, comme le montre l'algorithme 5.

Dans l'approche visant à atteindre un équilibre multicatégorie, chaque catégorie distincte est itérée sur de telle sorte que le sous-ensemble de données associé à cette catégorie soit identifié. Le nombre d'échantillons synthétiques nécessaires pour atteindre une taille maximale prédéfinie par catégorie est alors calculé. Si des échantillons supplémentaires sont requis, les données sont générées à l'aide de PC-SMOTE,

Machine Translated by Google

qui interpole entre les points de données existants et leurs voisins les plus proches. Parallèlement, une distribution équilibrée d'étiquettes de classe synthétique est créée avec un rapport d'équilibre spécifié par utilisant l'algorithme 4. Ces caractéristiques et étiquettes synthétiques sont ensuite incorporées dans le sous-ensemble de formation pour chaque catégorie. Le processus est répété pour toutes les catégories, ce qui donne lieu à un ensemble de données équilibré. Les hyperparamètres de cet algorithme 5 sont le nombre de voisins et le rapport d'équilibre.

Algorithme 3 Technique de suréchantillonnage de minorités synthétiques personnalisées (SMOTE)

```
procédure CUSTOMSMOTE(données, n_samples)
    SyntheticSamples ← matrice nulle de taille (n_samples× nombre de colonnes dans les données)
nn ← Voisins les plus proches (n_neighbours = 7).fit (données)
    voisins ← nn.kneighbors(data, return_distance = False)
    pour i ← 1 à n_samples faire
        sampleIdx ← entier aléatoire de 0 à (nombre de lignes dans les données − 1)
        nnIdx ← choix aléatoire parmi les voisins[sampleIdx, 1 :]
        di ff ← données[nnIdx] − données[sampleIdx]
        poids ← nombre aléatoire issu d'une distribution uniforme entre 0 et 1
        SyntheticSamples[i] ← données[sampleIdx] + poids × di ff
fin pour
    renvoyer des échantillons synthétiques
fin de la procédure
```

Algorithme 4 Générer des étiquettes synthétiques équilibrées

```
procédure GENBALSYNTHLABELS(n_samplesNeeded, balanceRatio)
    nClass1 ← int (n_samplesNeeded × balanceRatio)
    nClass0 ← n_samplesNeeded − nClass1
    étiquettes synthétiques ← [0] × nClass0 + [1] × nClass1
    SHUFFLE (syntheticLabels) renvoie                    Mélangez les étiquettes au hasard
    les étiquettes synthétiques
fin de la procédure
```

Algorithme 5 SMOTE de catégorie protégée

```
BalanceDataList ← initialiser une liste vide
pour chaque catégorie dans les catégories, faites
    categorySubset ← sélectionner les lignes dans train_data st 'combined_category' == catégorie
    fonctionnalités ← supprimer 'class', 'combined_category' decategorySubset
    nSamples ← max_size− nombre de lignes danscategorySubset
    si nÉchantillons > 0 alors
        SyntheticFeatures ← PCSmote ( fonctionnalités, nSamples)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels (nSamples, balanceRatio)
        caractéristiques synthétiques[′ classe′ ] ← étiquettes synthétiques
        caractéristiques synthétiques[′ Combined_category′ ] ← catégorie
        CategorySubsetBalanced ← concaténer CategorySubset et SyntheticFeatures
    autre
        catégorieSous-ensembleÉquilibré ← catégorieSous-ensemble
fin si
ajouter CategorySubsetBalanced à BalanceDataList
fin pour
BalanceData ← ajouter BalanceDataList et réinitialiser l'index
```

4.4. ADASYN de catégorie protégée

La méthode ADASYN de catégorie protégée imite la minorité synthétique adaptative (ADASYN) échantillonnage mais est légèrement modifié pour atteindre notre objectif d'échantillonnage de catégorie protégée. Notre algorithme PC-ADASYN est présenté dans l'algorithme 6. Il étend ADASYN en se concentrant sur la catégorie

Machine Translated by Google

densité plutôt que le déséquilibre des classes. Plus précisément, cette fonction fonctionne en recherchant le voisins des données, puis en calculant la densité de la catégorie de chaque point de données au sein de sa voisinage immédiat. Il pondère inversement ces densités pour prioriser les catégories minoritaires, ce qui rend plus susceptible de générer des échantillons synthétiques à partir de catégories sous-représentées. Le des échantillons synthétiques sont créés par interpolation entre les points de données sélectionnés et leurs voisins, similaire à SMOTE mais utilisant un poids aléatoire pour faire varier l'interpolation, assurant ainsi un ensemble de données synthétiques diversifiées. Cette approche permet de remédier au déséquilibre au niveau des catégories et enrichit la variance de l'ensemble de données, améliorant potentiellement la robustesse et l'équité des modèles ML formés sur ces données. Puisque cette méthode d'échantillonnage génère également de nouveaux échantillons par interpolation, L'algorithme 4 est utilisé pour générer des étiquettes de classe pour les nouveaux échantillons synthétiques.

Algorithme 6 PC-ADASYN pour l'équilibrage basé sur les catégories

```
procédure PCADASYNCATEGORIES(données, étiquettes, n_samplesNeeded, n_neighbors)
    n_neighbours ← n_neighbours + 1 3 : nn                    Y compris le point de données lui-même
← NearestNeighbours(n_neighbours).fit(data)
    distances, indices ← nn.kneighbors(data)
    densités ← tableau nul de longueur (données)
    pour i ← 0 à length(data) − 1 do
        catégorie_actuelle ← étiquettes[i]
        voisins_indices ← indices[i][1 :] densités[i]          Ignorer l'auto-index
        ← SUM(labels[neighbor_indices] == current_category)
fin pour
    poids ← 1/(densités + 1) poids ←                          Ajoutez 1 pour éviter la division par zéro
    poids/SOMME(poids) échantillons synthétiques              Normaliser les poids
    ← liste vide
    sampleIndices ← choix aléatoire avec remplacement à partir de la longueur (données) à l'aide de poids
    pour chaque idx dans sampleIndices , faites
        baseIdx ← idx
        voisin Idx ← RANDOMCHOICE(indices[baseIdx][1 :])
        di ff ← data[voisin Idx] − data[baseIdx]
        SyntheticSample ← data[baseIdx] + RANDOM() × di ff
        ajouter SyntheticSample à SyntheticSamples
fin pour
    tableau de retour (syntheticSamples)
fin de la procédure
```

Les algorithmes 4 et 6 sont combinés pour former notre échantillonnage ADASYN de catégorie protégée, comme le montre l'algorithme 7. Pour chaque catégorie, les données correspondant à cette catégorie sont isolée et le déficit de taille par rapport à la catégorie la plus grande est calculé. Si supplémentaire des échantillons sont nécessaires, la méthode PC-ADASYN est appliquée, générant des caractéristiques synthétiques qui respecter les caractéristiques de répartition de la catégorie. Ces fonctionnalités sont ensuite complétées avec des étiquettes générées synthétiquement, en maintenant un ratio d'équilibre de classe prédéfini. Le Le processus corrige non seulement les déséquilibres des catégories, mais enrichit également l'ensemble de données, potentiellement améliorer la précision prédictive et l'équité des modèles formés sur ces données.

4.5. Réglage des ensembles de données et des hyperparamètres

Pour tester les quatre méthodes d'échantillonnage, un classificateur était nécessaire pour évaluer les effets sur l'équité et la performance. En fin de compte, le type de classificateur n'est pas directement pertinent puisque le L'objectif est d'atténuer le compromis équité-performance, plutôt que de trouver le meilleur classificateur. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser des arbres de décision univariés basés sur CART [56] en raison de leur robustesse au bruit et aux données manquantes. L'implémentation spécifique que nous avons choisie était extrait de la bibliothèque sklearn (version 1.5.1) [57]. De plus, les arbres de décision nous permettent de contrôlez la force d'ajustement en définissant la profondeur de l'arbre appris. Cela nous permet de comparer l'équité et les performances à différents niveaux d'ajustement.

Machine Translated by Google

Le processus commence par combiner des catégories protégées au sein de chaque ensemble de données, en appliquant un codage ponctuel pour créer de nouvelles fonctionnalités multicatégories, puis en effectuant un codage d'étiquettes. Les ensembles de données ont ensuite été divisés à l'aide d'une validation croisée stratifiée de 10 fois pour garantir une distribution représentative des classes dans chaque pli. Pour chaque pli, la formation a été réalisée sur des données échantillonnées à l'aide des méthodes décrites précédemment, tandis que la classification a été testée sur les ensembles de tests non échantillonnés correspondants. La cohérence dans la formation du modèle a été maintenue en appliquant une profondeur d'arbre identique à toutes les méthodes d'échantillonnage, et les résultats fournis sont des moyennes des exécutions multipliées par 10 avec leurs intervalles de confiance correspondants.

Algorithme 7 ADASYN de catégorie protégée

```
1 : BalanceDataList ← initialiser une liste vide 2 : pour
chaque catégorie dans les catégories,
3 :     fairecategorySubset ← sélectionner parmi new_data3 st 'combined_category' == caractéristiques
4 :     de la catégorie ← supprimer 'class', 'combined_category' decategorySubsetcategoryLabels
5 :     ← extraire 'combined_category' decategorySubset nSamplesNeeded ← max_size
6 :     moins le nombre de lignes dans CategorySubset si nSamplesNeeded > 0 alors
7:      SyntheticFeatures ← PCAdasyn
8 :         ( features, CategoryLabels, nSamplesNeeded) SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels
9 :         (nSamplesNeeded, balanceRatio) SyntheticFeatures [ ′ class′ ] ← SyntheticLabels
dix:        SyntheticFeatures [ ′ y′ ] ← catégorie
11 :        catégorieSubsetBalanced concaténer CategorySubset avec
12 :        SyntheticFeatures sinon CategorySubsetBalanced ← CategorySubset 15 : terminer si 16 : ajouter
13 :
14 :    CategorySubsetBalanced à BalanceDataList 17 : terminer
pour 18 :
BalanceData ← concaténer BalanceDataList et réinitialiser l'index
```

Trois ensembles de données ont été sélectionnés dans le référentiel UCI [58] pour notre analyse : l' ensemble de données Adult Income [59], l'ensemble de données German Credit [60] et l' ensemble de données Correctional Offender Management Profiling for Alternative Sanctions (COMPAS). L'ensemble de données sur le revenu des adultes vise à prédire si un individu gagne plus de 50 000 USD, avec huit attributs catégoriels et quatre attributs numériques, avec des variables protégées correspondant à l'âge (jeune ou adulte), au sexe (homme ou femme) et à la race (blanc ou autres). L'ensemble de données sur le revenu des adultes a été donné à l'UCI en 1996. L'ensemble de données sur le crédit allemand, utilisé pour prédire la solvabilité, comprend 20 attributs catégoriels et deux attributs numériques, avec des variables protégées d'âge et de sexe. L'ensemble de données allemand sur le crédit a été donné à l'UCI en 1994. L'ensemble de données COMPAS [61], qui évalue les taux de récidive aux États-Unis, comprend six caractéristiques catégorielles et six caractéristiques numériques, avec des variables protégées d'âge, de race et de sexe. L'ensemble de données a été publié en 2018. Ces ensembles de données ont été sélectionnés car ils représentent les ensembles de données de pointe pour mesurer les biais et la discrimination et sont largement utilisés dans d'autres études sur les biais algorithmiques et l'équité (voir section 3). De plus, les ensembles de données ont différentes tailles, allant de petite à grande, ce qui les rend adaptés pour tester nos méthodes d'échantillonnage.

Le réglage des hyperparamètres a été effectué à l'aide d'une recherche par grille [62] pour explorer un large éventail de paramètres, complétés par des évaluations visuelles pour identifier les paramètres optimaux qui équilibrent la différence de cotes égalisée (EOD) et la précision. Pour l'ensemble de données Adult Income, les hyperparamètres optimaux comprenaient une profondeur d'arbre maximale de 3 et, pour PC-SMOTE et PC-ADASYN, un paramètre de voisin le plus proche de 5 avec un rapport équilibré de 0,34. Ces paramètres étaient tout aussi efficaces pour l'ensemble de données sur le crédit allemand. Pour l'ensemble de données COMPAS, une profondeur d'arbre maximale de 2 était optimale pour toutes les méthodes d'échantillonnage. PC-SMOTE et PC-ADASYN ont été ajustés au paramètre du voisin le plus proche de 3 et à un rapport équilibré de 0,60.

Machine Translated by Google

5. Résultats

Les quatre stratégies d'échantillonnage ont été appliquées aux trois ensembles de données décrits ci-dessus et ont évalué leur impact à l'aide d'un simple classificateur d'arbre de décision univarié. Les résultats en
Les tableaux 1 à 3 montrent des différences notables dans les performances du modèle selon cinq stratégies d'échantillonnage : pas d'échantillonnage, suréchantillonnage, échantillonnage proportionnel, PC-SMOTE et PC-ADASYN sur nos trois ensembles de données. Chaque méthode a été évaluée en fonction de la précision, de la macro F1, de l'égalisation Différence de cotes (EOD) et parité statistique (SP). Les résultats ont été mesurés en précision et macro F1 car ces deux métriques sont les métriques de classification les plus populaires. Aussi, limiter la métrique à deux rend les résultats comparables pour l'analyse statistique.

Pour vérifier la signification statistique des résultats de chaque méthode, nous avons utilisé la méthode de Friedman test, une alternative non paramétrique à l'ANOVA unidirectionnelle avec mesures répétées. Sur trouvant des résultats significatifs du test de Friedman, nous avons procédé au test post hoc de Nemenyi test. Ce test est utilisé pour évaluer des comparaisons par paires entre les méthodes afin de déterminer quelles méthodes diffèrent statistiquement les unes des autres. Le test Nemenyi est avantageux dans ce paramètre car il prend en compte plusieurs comparaisons sans supposer que c'est normal distributions, fournissant ainsi un moyen robuste de comprendre les différences spécifiques par paire.

Pour l'ensemble de données sur le revenu des adultes (tableau 1), la méthode sans échantillonnage a donné une précision de 0,82, établissant une référence élevée pour la comparaison. Toutefois, elle démontre une approche légèrement biaisée prédiction avec un EOD de 0,36 et une disparité minimale dans les taux de prédiction (SP = 0,02). Dans contraste, le suréchantillonnage a conservé la même précision mais a légèrement abaissé la macro F1 à 0,65, indiquant des problèmes de surajustement potentiels tout en détériorant l'équité (EOD = 0,66) et disparité croissante dans les taux de prédiction (SP = 0,09). L'échantillonnage proportionnel a diminué précision à 0,79 mais a amélioré la macro F1 à 0,79, suggérant un meilleur équilibre entre précision et rappel. Cependant, il a considérablement augmenté SP à 0,71, ce qui indique une augmentation substantielle disparité des taux de prédiction positive, ce qui soulève des inquiétudes quant à l'équité du modèle. Le deux approches personnalisées pour SMOTE et ADASYN ont été conçues spécifiquement pour améliorer sur ces mesures. PC-SMOTE a montré une performance modérée avec une précision de 0,81 et un EOD amélioré de 0,25, suggérant une équité améliorée par rapport au suréchantillonnage de base et la méthode sans échantillonnage. Cependant, il a toujours enregistré un macro F1 inférieur (0,63), indiquant problèmes de fausses déclarations dans la génération de données synthétiques. PC-ADASYN s'est avéré être le approche la plus équilibrée, maintenant une grande précision (0,82) et une meilleure gestion de la classe déséquilibres, avec une amélioration modérée de l'équité (EOD = 0,28) et une augmentation de la disparité du taux de prédiction (SP = 0,09). Dans l'ensemble, la précision de base est statistiquement significativement meilleur que l'échantillonnage proportionnel alors qu'il n'est pas statistiquement significatif car par rapport aux autres méthodes d'échantillonnage. Pour la macro F1, l'échantillonnage proportionnel est statistiquement significativement meilleur que les autres méthodes d'échantillonnage. Pour l'EOD, PC-ADASYN est statistiquement meilleure que les autres méthodes d'échantillonnage tandis que la méthode sans échantillonnage SP est statistiquement significativement meilleur que les autres méthodes d'échantillonnage.

Tableau 1. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données sur le revenu des adultes avec des intervalles de confiance de 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Aucun échantillonnage	0,82 ± 0,00	0,66 ± 0,01	0,36 ± 0,18	0,02 ± 0,00
Suréchantillonnage	0,82 ± 0,02	0,65 ± 0,06	0,66 ± 0,2	0,09 ± 0,02
Échantillon prop.	0,79 ± 0,05	0,79 ± 0,06	0,46 ± 0,12	0,71 ± 0,10
PC-SMOTE	0,81 ± 0,05	0,63 ± 0,07	0,25 ± 0,21	0,07 ± 0,00
PC-ADASYN	0,82 ± 0,04	0,64 ± 0,07	0,28 ± 0,19	0,09 ± 0,02

Les résultats des expériences sur l'ensemble de données du crédit allemand montrent également des impacts variables de chaque stratégie d'échantillonnage, notamment en ce qui concerne l'équité et l'exactitude, comme le montre le tableau 2. Sans échantillonnage, le modèle de référence a atteint une précision de 0,72 mais a montré des résultats significatifs. biais dans sa prédiction, avec un EOD de 0,88, indiquant une disparité substantielle d'erreur taux entre les groupes dans les attributs protégés. Implémentation du suréchantillonnage maintenue précision tout en améliorant la macro F1 à 0,68 et en réduisant notamment l'EOD à 0,37, quoique à

Machine Translated by Google

le coût de l'augmentation du SP à 0,35, mettant en évidence un compromis potentiel entre différentes équités mesures. L'échantillonnage proportionnel a légèrement réduit la précision à 0,68 mais a obtenu le meilleur Score F1 de 0,69. Il a également abaissé l'EOD à 0,32, ce qui suggère qu'il équilibre efficacement les prévisions. qualité avec équité. PC-SMOTE montre une amélioration de la précision avec 0,73 mais une valeur inférieure macro F1 de 0,55 ; l'équité du modèle montre une énorme amélioration par rapport à la référence avec un EOD de 0,15 et un SP modéré de 0,1. PC-ADASYN montre une précision similaire à celle du la ligne de base est à 0,72, mais avec le F1 macro le plus bas de 0,48, ce qui suggère un compromis potentiel en précision et en rappel. Cependant, le modèle présente la meilleure prédiction d'équité avec un EOD de 0,13 et un SP de 0,06. Dans l'ensemble, le résultat montre que la précision de l'absence d'échantillonnage n'est pas statistiquement significatif par rapport aux autres méthodes d'échantillonnage, à l'exception des échantillonnages proportionnels tandis que pour l'EOD, les résultats de toutes les méthodes d'échantillonnage sont statistiquement significatifs en comparaison avec la méthode sans échantillonnage.

Tableau 2. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données du crédit allemand avec des intervalles de confiance à 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Pas d'échantillonnage	0,72 ± 0,03	0,62 ± 0,06	0,88 ± 0,10	0,07 ± 0,01
Suréchantillonnage	0,72 ± 0,05	0,68 ± 0,04	0,37 ± 0,16	0,35 ± 0,11
Prop. Échantillon	0,69 ± 0,04	0,69 ± 0,07	0,32 ± 0,26	0,29 ± 0,10
PC-SMOTE	0,73 ± 0,05	0,55 ± 0,09	0,15 ± 0,09	0,1 ± 0,02
PC-ADASYN	0,72 ± 0,03	0,48 ± 0,11	0,13 ± 0,02	0,06 ± 0,00

Le tableau 3 montre les résultats de notre expérience avec l'ensemble de données COMPAS. Ces résultats révèlent des variations significatives dans les performances du modèle selon les différentes stratégies d'échantillonnage. L'approche de base, sans échantillonnage, a atteint une précision et un score macro F1 de 0,89 mais a montré des disparités plus élevées dans les mesures d'équité, avec une différence de cotes égalisée (EOD) de 0,39 et une parité statistique (SP) de 0,29. Cela souligne les biais potentiels qui des modèles non ajustés peuvent s'afficher envers des groupes protégés. L'application du suréchantillonnage précision légèrement améliorée à 0,90 mais également amélioration notable de l'équité, diminuant l'EOD à 0,26. Cela suggère une efficacité dans la réduction des disparités dans les résultats sans compromettre SP. À l'inverse, l'échantillonnage proportionnel, tout en augmentant la précision et le macro F1 à 0,90 et 0,91, respectivement, a également atteint un EOD de 0,26, l'améliorant par rapport à la référence tout en enregistrant également un SP plus élevé de 0,36, indiquant une augmentation potentielle de la disparité des résultats positifs résultats à travers les groupes. PC-SMOTE et PC-ADASYN, avec des scores identiques en précision, macro F1 et SP ont réussi à maintenir les améliorations d'équité avec un EOD de 0,30, bien que ces méthodes aient également augmenté le SP à 0,47. Dans l'ensemble, les résultats montrent que tant la précision et l'EOD de nos méthodes d'échantillonnage sont statistiquement significativement meilleures que la méthode sans échantillonnage.

Tableau 3. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données COMPAS avec des intervalles de confiance à 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Pas d'échantillonnage	0,89 ± 0,04	0,89 ± 0,04	0,39 ± 0,15	0,29 ± 0,17
Suréchantillonnage	0,90 ± 0,03	0,90 ± 0,05	0,26 ± 0,14	0,25 ± 0,07
Prop. Échantillon	0,90 ± 0,05	0,91 ± 0,04	0,26 ± 0,12	0,36 ± 0,10
PC-SMOTE	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,02	0,30 ± 0,11	0,47 ± 0,19
PC-ADASYN	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,03	0,30 ± 0,13	0,47 ± 0,21

6. Discussion

Les résultats des expériences sur les trois ensembles de données confirment que la catégorie protégée l'échantillonnage peut améliorer considérablement l'équité du modèle, souvent sans compromettre de manière significative la précision des prévisions. Dans certains cas, une amélioration de la précision et de la macro F1 a également été démontré. Se concentrer sur les résultats de l'ensemble de données sur le revenu des adultes, PC-SMOTE et PC-ADASYN

Machine Translated by Google

ont démontré des améliorations notables de l'EOD et maintenu des niveaux modérés de SP. L' efficacité de ces méthodes peut être largement attribuée à leurs techniques d'interpolation sophistiquées. Par exemple, un examen visuel des arbres de décision générés sans échantillonnage et PC-ADASYN fournit des contrastes perspicaces. Des exemples provenant d'un seul pli représentatif sont présentés respectivement dans les figures 1 et 2. L'arbre de décision appris sans échantillonnage a sélectionné sa racine avec une caractéristique étroitement associée aux attributs protégés, agissant ainsi comme un attribut proxy. Cela a conduit à un biais de prédiction prononcé, comme en À l'inverse, l'arbre de décision formé sur les données générées à l'aide de PC-ADASYN a commencé avec une fonctionnalité qui généralisait très bien les prédictions et atténuait les biais, comme en témoigne une amélioration notable de l'équité du modèle et une impureté de Gini plus élevée, indiquant une division initiale plus pure.

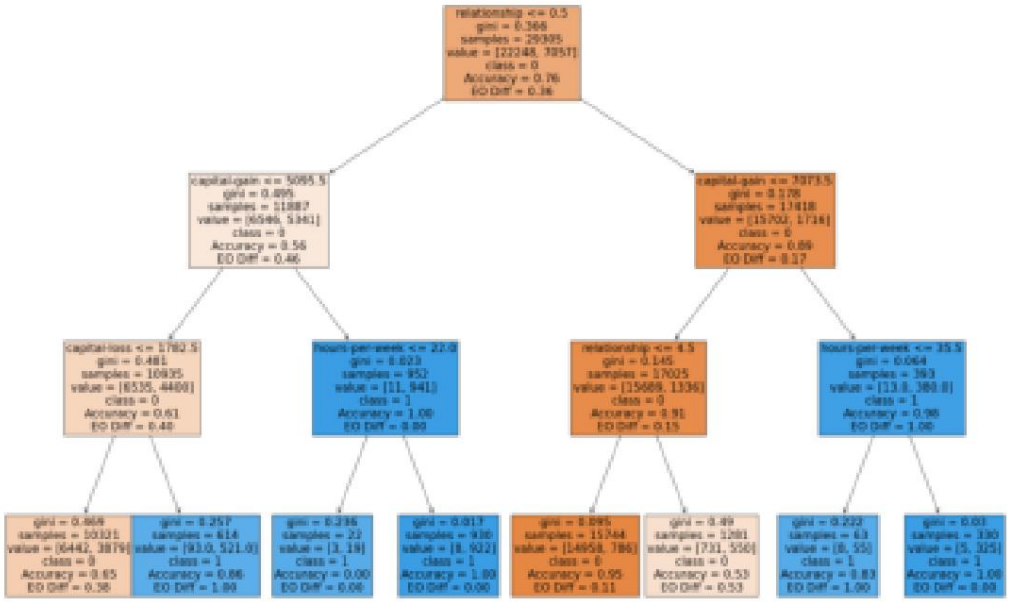


Figure 1. Exemple d'arbre de décision formé sur le revenu des adultes sans échantillonnage.

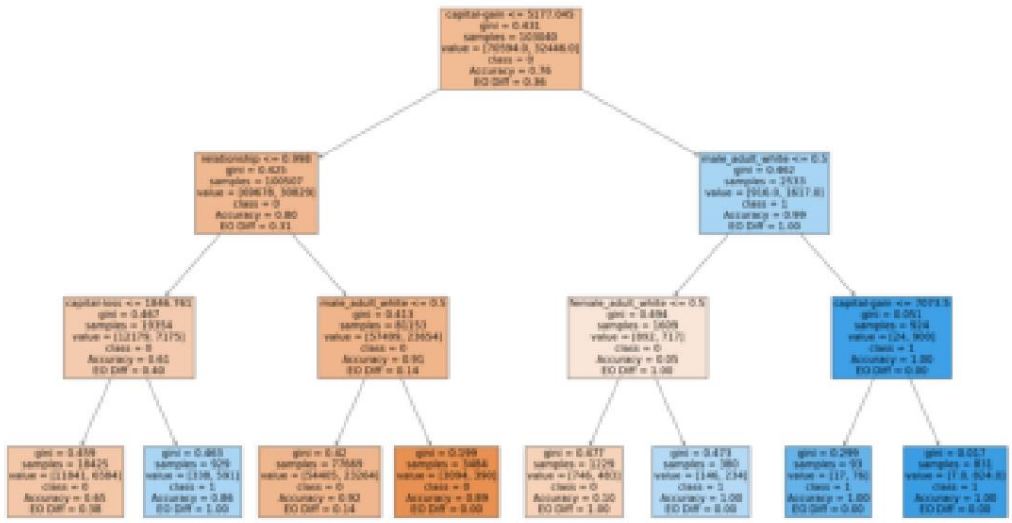


Figure 2. Arbre de décision de PC-ADASYN sur le revenu des adultes.

Machine Translated by Google

6.1. Comparaison de l'équité et de la performance

En comparant le suréchantillonnage et l'échantillonnage proportionnel, les approches des méthodes visant à augmenter la taille de l'échantillon en dupliquant les lignes de données existantes étaient simples et n'ont pas apporté d'améliorations substantielles en matière d'EOD. Ce résultat est logique puisque ces méthodes ont tendance à reproduire les préjugés existants, ce qui peut potentiellement exacerber les problèmes d'équité plutôt que de les atténuer. Cela est particulièrement évident lorsque l'on considère l'ensemble de données sur le revenu des adultes, où les classes sont extrêmement déséquilibrées. Ces stratégies de réplication naïves ne disposent pas de la capacité d'interpolation de PC-SMOTE et PC-ADASYN pour ajuster les échantillons à proximité des limites de décision, ce qui est crucial pour atténuer les biais dans l'ensemble de données. En revanche, les stratégies d'interpolation utilisées par SMOTE et ADASYN élargissent l'ensemble de données et améliorent sa diversité. Ceci est particulièrement efficace pour les échantillons proches des limites de décision, où de légers changements dans les caractéristiques peuvent affecter de manière significative l'équité des prédictions. En interpolant entre les échantillons, SMOTE et ADASYN déplacent efficacement ces échantillons limites vers des régions plus équitables de l'espace des caractéristiques, confrontant ainsi directement et réduisant les biais plus efficacement que les méthodes qui augmentent le volume d'échar
La fonction de génération de classes (algorithme 4) contribue également à augmenter la répartition globale des classes.
Les résultats de nos PC-SMOTE et PC-ADASYN sur le revenu des adultes montrent également une supériorité sur les résultats obtenus dans [41], où une précision de 0,59 et un SP de 0,17 ont été obtenus.
De plus, les résultats de PC-SMOTE et PC-ADASYN montrent une supériorité sur les résultats obtenus dans [40], où une EOD de 0,89 et une précision légèrement meilleure de 0,84.

En examinant les résultats de l'ensemble de données sur le crédit allemand, nous avons observé une tendance similaire à celle observée dans l'ensemble de données sur le revenu des adultes : la méthode sans échantillonnage présente un biais très élevé concernant l'EOD. Le faible SP de 0,07 indique une disparité minime dans les taux de prédiction positive entre les groupes, mais ce n'est pas en soi un bon moyen de mesurer l'équité puisque le groupe favorisé a plus d'échantillons que le groupe défavorisé. Cela a pour effet de fausser le calcul du SP puisqu'il ne prend en compte que les décisions positives dans chaque groupe, qui sont influencées par la taille de l'échantillon. L'un des points à retenir est l'importance d'utiliser plusieurs mesures d'équité pour visualiser de manière globale l'impact d'un modèle sur toutes les parties prenantes. Pour le suréchantillonnage, nous avons constaté une amélioration de l'EOD avec un SP similaire ; cela montre que l'augmentation du nombre d'échantillons pour chacun des attributs protégés de la multicatégorie améliore l'équité par rapport à l'EOD. De plus, le SP mis à jour reflète ce à quoi ressemblera un nombre plus égal d'échantillons pour chaque multicatégorie, contrairement à la ligne de base où le groupe favorisé a cinq fois plus d'échantillons que le groupe défavorisé. La précision de l'échantillonnage proportionnel diminue car le nombre de base d'échantillons sélectionnés après le réglage des hyperparamètres était insuffisant pour que le modèle généralise l'ensemble de tests non échantillonné, conduisant à un surajustement. Le surapprentissage a été confirmé en considérant la précision de l'entraînement. Il est intéressant de noter que le modèle n'échange pas la précision contre le rappel comme les autres modèles, ce qui donne à l'échantillonnage proportionnel la macro F1 la plus élevée.

En ce qui concerne l'équité, nous avons constaté une augmentation de l'EOD par rapport à la référence et au suréchantillonnage . Cela est dû au fait que chaque multicatégorie est représentée sur les mêmes décomptes de base. Cela peut améliorer l'équité du modèle, car celui-ci a désormais une vision plus large des catégories et permet de meilleures prédictions et, en fin de compte, de décisions plus équitables. PC-SMOTE et PC-ADASYN jouent un rôle central en réduisant considérablement les biais dans les prédictions des modèles. Cette cohérence a confirmé la robustesse de ces méthodes sur différents ensembles de données. Notamment , aucune des deux méthodes ne compromet la précision alors que les deux améliorent l'équité, illustrant leur efficacité dans la gestion des compromis généralement associés à la modélisation prédictive.
Ces résultats démontrent les fortes capacités d'interpolation inhérentes à PC-SMOTE et PC-ADASYN. Ces méthodes réattribuent efficacement les échantillons dans l'espace des caractéristiques, en particulier en déplaçant ceux des régions défavorisées des limites de décision négatives vers des limites de décision plus positives . De tels ajustements sont essentiels pour atténuer les résultats biaisés et promouvoir l'équité dans les processus décisionnels automatisés. La macro F1 dans les deux modèles diminue par rapport à la référence car un nombre plus élevé d'échantillons est requis pour que le modèle fonctionne mieux en généralisation, ce que cet ensemble de données ne prend pas en charge. Plus précisément, l'ensemble de données contient 700 échantillons pour la classe 0 et 300 échantillons pour la classe 1, ce qui signifie que l'ensemble de test

Machine Translated by Google

ne contient que 30 échantillons pour la classe 1. Ce petit nombre d'échantillons a amené les deux modèles à échanger le rappel contre la précision en classe 1. Notamment, nous avons constaté un faible rappel pour la classe 1, ce qui conduit finalement à un faible score f1 pour la classe 1 et depuis la macro F1 fait la moyenne des deux scores f1 et les traite de la même manière, cela affecte les performances des deux modèles en macro F1. Dans l'ensemble, les deux modèles donnent un modèle plus juste avec une bonne précision par rapport à la méthode de référence et aux deux autres méthodes d'échantillonnage.

L'évaluation de l'ensemble de données COMPAS valide en outre l'efficacité de nos méthodes d'échantillonnage . Les tendances distinctes qui émergent s'alignent sur celles observées dans les ensembles de données sur le revenu des adultes et le crédit allemand, soulignant la robustesse de nos résultats. Notamment, les techniques de suréchantillonnage et d'échantillonnage proportionnel ont démontré des améliorations substantielles en termes de différence de cotes égalisées (EOD) et de précision, tandis que le suréchantillonnage s'améliore également notablement en SP. Cette amélioration est probablement due à la composition et à l'équilibre uniques au sein de l'ensemble de données COMPAS, contrairement aux autres ensembles de données dans lesquels les classes sont déséquilibrées. Le succès du suréchantillonnage et de l'échantillonnage proportionnel dans ce contexte peut être attribué à la nature équilibrée de l'ensemble de données, qui permet une duplication répétée des lignes existantes (techniques d'échantillonnage employées par ces méthodes) pour améliorer l'ensemble de données sans introduire de biais significatif vers un élément particulier. classe. Cette méthode augmente efficacement la représentation de toutes les classes et des attributs protégés sous une forme équilibrée, ce qui rend ces techniques particulièrement efficaces pour les ensembles de données où les domaines de caractéristiques contribuent de manière égale aux prédictions et où les distributions initiales de classes ne souffrent pas de déséquilibre sévère . Cela peut en outre être vérifié à partir de leur macro F1, car aucun des modèles n'échange de précision contre un rappel. L'amélioration de SP dans le suréchantillonnage peut être attribuée au nombre plus élevé d'échantillons en suréchantillonnage par rapport à l'échantillonnage proportionnel. Concernant PC-SMOTE et PC-ADASYN, ces algorithmes montrent une amélioration par rapport à la référence en termes de précision et d'EOD. Ces tendances suivent celles des résultats précédents. Une chose notable à cet égard se traduit par la forte baisse de SP qui peut être attribuée à notre nouvelle étiquette qui a été générée pour que l'ensemble de données soit biaisé vers la classe négative. Ces résultats montrent la difficulté d'optimiser deux ou plusieurs mesures d'équité à la fois et comment cette optimisation peut s'influencer mutuellement.

6.2. Impact de la profondeur de l'arbre sur l'équité et la précision

Dans cette étude, l'impact de la profondeur de l'arbre de décision sur les performances du modèle a également été étudié, en examinant spécifiquement comment les variations de la profondeur de l'arbre influencent la précision et l'EOD. Comprendre l'effet de la profondeur est crucial car cela donne un aperçu des effets allant du sous-apprentissage au surapprentissage et aide à identifier le niveau de complexité optimal auquel la précision et l'équité sont maximisées. Initialement, l'arbre de décision pouvait croître sans contraintes sur toute sa profondeur, soit en moyenne environ 30 branches. L' arbre a ensuite été examiné visuellement pour en déduire la profondeur maximale en excluant les branches non fendues. Pour analyser systématiquement les effets de la profondeur des arbres, la profondeur maximale des arbres a pu varier de 1 à 30. Chaque limite de profondeur a été évaluée à l'aide d'une validation croisée dix fois pour garantir la robustesse et la généralisabilité des résultats.

Pour chaque configuration de profondeur d'arbre, la précision et l'EOD ont été mesurées sur l' ensemble de test. De plus, des intervalles de confiance de 95 % ont été calculés pour les mesures des dix volets. Cette analyse statistique a mis en évidence la profondeur avec laquelle l'arbre de décision équilibrait le compromis entre précision et équité tout en prenant également en compte le compromis statistique sous-jacent biais-variance. Ce faisant, il a été possible d'identifier le « point idéal », un point délicat où l'arbre de décision maintient une précision prédictive élevée sans compromettre l'équité, contrecarrant ainsi le compromis souvent cité et présenté dans la littérature précéden
Les figures 3 à 7 montrent les tracés de précision et d'EOD par rapport à la profondeur maximale pour chacune des cinq méthodes d'échantillonnage de l'ensemble de données sur le revenu des adultes.

Machine Translated by Google

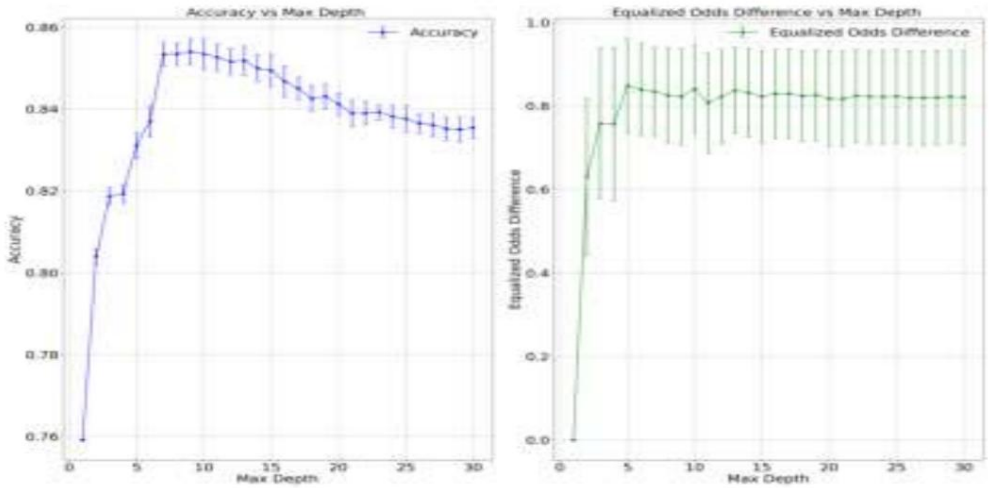


Figure 3. Graphiques du revenu des adultes sans échantillonnage, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale des arbres allant de 1 à 30.

Sur la base de résultats tels que ceux présentés dans les figures 3 et 4, il y a une augmentation initiale notable de la précision à mesure que la profondeur maximale augmente pour les méthodes sans échantillonnage et avec suréchantillonnage . Cependant, les deux méthodes présentent une baisse de précision à partir d'une profondeur de 10, suggérant l'apparition d'un surapprentissage. En conséquence, l'EOD diminue fortement avec l'augmentation de la profondeur jusqu'à environ 10 profondeur, au-delà de laquelle elle se stabilise. Cette tendance indique que même si les arbres plus profonds améliorent initialement l'équité, ils atteignent finalement un seuil au-delà duquel aucun gain supplémentaire n'est observé. Rappelant que l'objectif d'équité était de minimiser l'EOD, une observation clé est que le réglage de la profondeur maximale entre trois et cinq établit un équilibre optimal entre l'obtention d'une grande précision et le

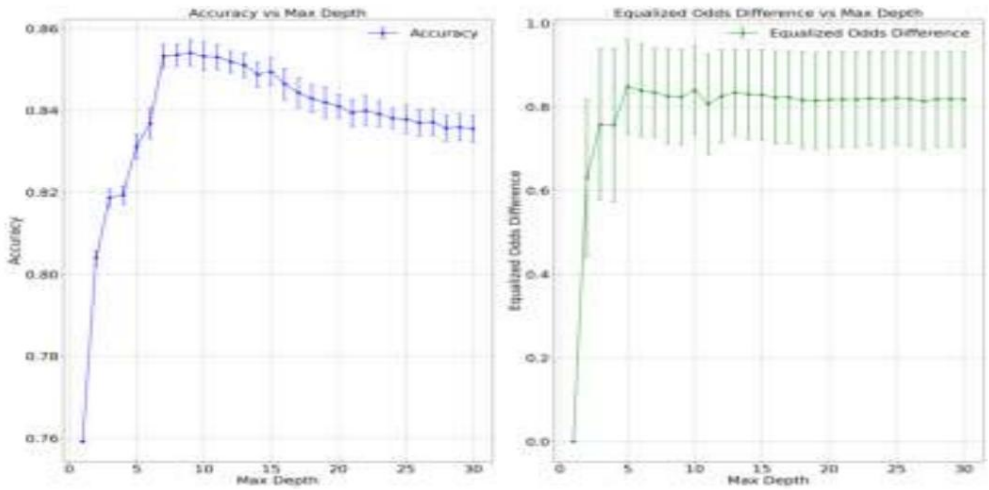


Figure 4. Graphiques du revenu des adultes utilisant le suréchantillonnage, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

Lorsque l'on considère les résultats présentés dans la figure 5, la méthode d'échantillonnage proportionnel augmente continuellement la précision avec la profondeur de l'arbre, culminant à une profondeur d'environ 26. À l'inverse, l'EOD augmente initialement avant de diminuer et de se stabiliser à une profondeur d'environ 15. Les larges intervalles de confiance observés dans la métrique EOD suggèrent une variabilité significative dans les résultats en matière d'équité. Cette découverte souligne l'importance de sélectionner une profondeur qui minimise la variabilité de l'équité tout en maximisant la précision.

Machine Translated by Google

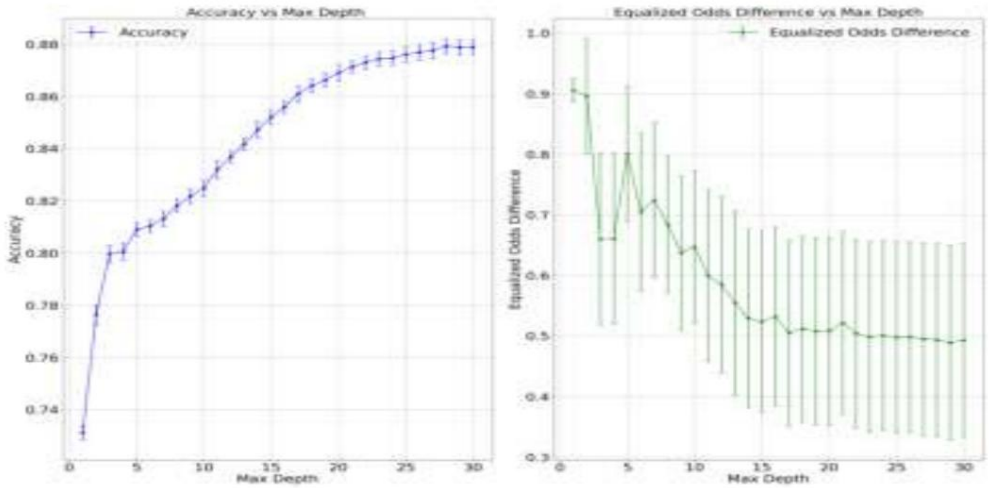


Figure 5. Graphiques du revenu des adultes utilisant un échantillonnage proportionnel, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale des arbres allant de 1 à 30.

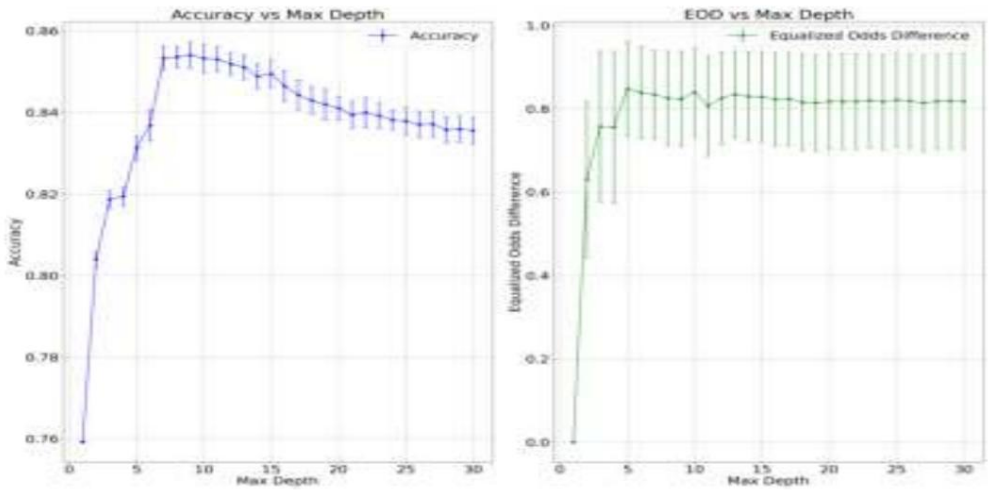


Figure 6. Graphiques du revenu des adultes utilisant PC-SMOTE, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

Les figures 6 et 7, représentant respectivement les résultats utilisant PC-SMOTE et PC-ADASYN, présentent de légères tendances à la baisse en termes de précision, qui s'améliorent brièvement avant de redescendre, une tendance indiquant un surapprentissage à de plus grandes profondeurs. Les mesures EOD de ces méthodes montrent une stabilité initiale aux profondeurs inférieures, une augmentation aux profondeurs moyennes et un déclin, suggérant des interactions complexes entre la génération d'échantillons synthétiques et la délimitation des limites de décision . Compte tenu de ces observations, une profondeur maximale de 3 a été choisie pour nos expériences, car elle représente un « point idéal » où la précision et l'EOD sont optimisées.

Compte tenu de ces résultats, une conclusion consiste à remettre en question le compromis souvent présumé entre exactitude et équité en démontrant que notre méthode PC-ADASYN surpasse systématiquement les références dans les trois ensembles de données en termes d'exactitude et d'équité. Cette découverte est significative, car elle suggère qu'il est possible d'améliorer l'équité du modèle sans sacrifier la précision grâce à des méthodes d'échantillonnage appropriées et qu'un réglage du modèle est possible. Cependant, notre analyse révèle également des scénarios dans lesquels les ajustements de la complexité du modèle, en particulier la profondeur maximale des arbres de décision, peuvent améliorer la précision au détriment de l'équité, comme l'indique l'augmentation de la différence de cotes égalisée (EOD). On s'attend toutefois à ce que le couplage de méthodes d'échantillonnage avec des méthodes de traitement telles que la régularisation basée sur l'équité puisse compenser ces effets. Ces décisions mettent en évidence le pouvoir discrétionnaire des chercheurs pour équilibrer les mesures de performance des modèles en fonction des objectifs et des contraintes spéc

La quantité d'échantillon et la complexité temporelle sont comme toutes les autres méthodes d'échantillonnage. Comme le

Machine Translated by Google

la quantité d'échantillon augmente, la complexité temporelle augmente mais dans l'ensemble, les méthodes d'échantillonnage ont la même complexité temporelle que leurs algorithmes sous-jacents car elles ont les mêmes fonctionnalités.

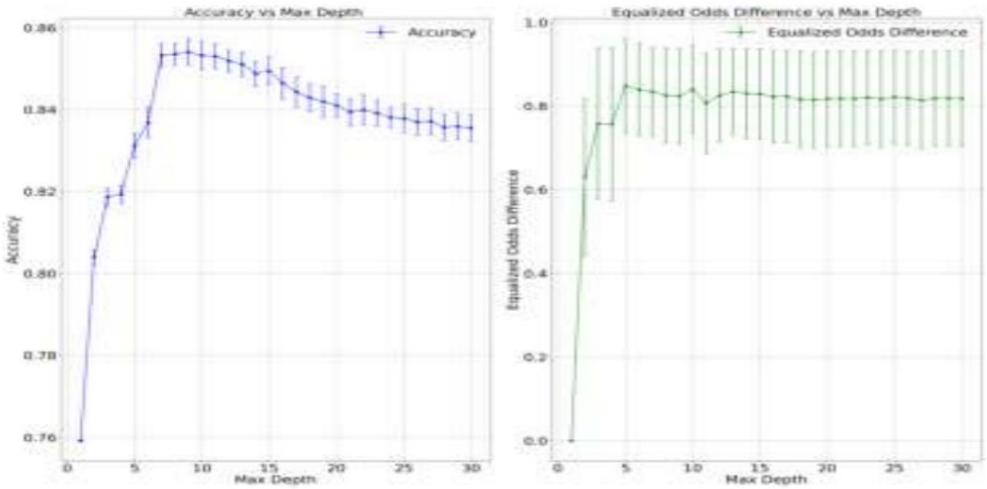


Figure 7. Graphiques du revenu des adultes utilisant PC-ADASYN, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

De plus, nos résultats soulignent la complexité de l'optimisation simultanée de plusieurs mesures d'équité. Par exemple, les efforts visant à améliorer la parité statistique (SP) en favorisant des prédictions plus positives pour chaque groupe protégé dans l'ensemble de données COMPAS ont conduit à une réduction involontaire des prédictions négatives. Ce changement a eu un impact négatif sur le taux de faux positifs (FPR), une composante de l'EOD, aggravant ainsi la métrique EOD à mesure que SP s'améliorait. Ce phénomène illustre les tensions mathématiques inhérentes entre les mesures d'équité, où l'optimisation de l'une peut nuire à l'autre. L'ensemble de données COMPAS, avec sa distribution de classes presque équilibrée, fournit un exemple concret de la façon dont les caractéristiques de l'ensemble de données peuvent influencer le comportement des mesures d'équité. L'optimisation de SP dans ce contexte implique une mesure biaisée de l'équité, en particulier là où des différences inhérentes existent entre les groupes dans les attributs protégés. Ceci est étayé par la littérature indiquant que SP peut ne pas tenir compte de manière adéquate des différences de groupe, conduisant potentiellement à des conclusions trompeuses sur l'équité d'un modèle (63).

7. Limites et travaux futurs

La nature même de cette étude est telle qu'il n'est pas possible d'aborder toutes les questions liées à l'équité et au soi-disant compromis équité-performance. Il existe donc des limites aux travaux rapportés ici. Néanmoins, nous espérons et avons l'intention que les travaux rapportés ici suggèrent des pistes d'exploration supplémentaires dans ce domaine important.

L'une des limites de cette étude est que notre méthode d'échantillonnage n'a pas été spécifiquement conçue pour optimiser des mesures d'équité arbitraires. En d'autres termes, étant donné qu'il existe souvent des compromis inhérents entre l'ensemble disponible de mesures d'équité, la décision a été prise de se concentrer sur une approche indépendante des mesures, en reconnaissant que les résultats auraient pu différer pour d'autres mesures. C'est également en partie la raison pour laquelle nous avons constaté des comportements différents entre EOD et SP.

En outre, il est reconnu que, même si la méthode ML sous-jacente ne devrait pas être pertinente pour la méthode proposée, elle n'a pas réellement été testée. Par conséquent, à l'avenir, cette recherche sera étendue en considérant les impacts d'autres algorithmes de ML tels que la régression logistique, l'ID3 flou, le K-plus proche voisin et les méthodes d'ensemble telles que les forêts aléatoires ou les arbres boostés par gradient pour évaluer la généralisabilité de notre de nouvelles méthodes d'échantillonnage. Le but d'une telle étude serait de vérifier que nos méthodes sont indépendantes de l' algorithme ML utilisé. En outre, cela permettrait de valider si les améliorations observées en matière d'équité et d'exactitude sont spécifiques au modèle ou peuvent être appliquées universellement.

Machine Translated by Google

De plus, il est reconnu que seuls trois ensembles de données distincts ont été pris en compte, des ensembles de données qui ont été largement étudiés dans le domaine. Cela soulève la crainte que les méthodes soient adaptées à ces données plutôt que d'aborder la question plus large de l'équité du ML. Pour résoudre ce problème, des expériences avec des ensembles de données plus vastes et plus diversifiés sont prévues afin de fournir des informations plus approfondies sur l'évolutivité et la robustesse de nos techniques. Un autre domaine de travail futur consiste à affiner notre approche d'échantillonnage multicatégorie en incorporant des subdivisions plus granulaires des catégories protégées, révélant potentiellement des biais plus subtils et fournissant une compréhension plus nuancée de l'équité.

Enfin, il est reconnu que des méthodes alternatives ont été proposées pour atténuer les biais , et ces méthodes n'ont pas du tout été étudiées dans ce travail. Les travaux futurs impliqueraient des comparaisons avec davantage de stratégies d'échantillonnage. Une comparaison plus directe des méthodes proposées avec les méthodes de traitement et de post-traitement sera effectuée. Par exemple , l'incorporation de méthodes de traitement, telles que la régularisation [22], ou une méthode de post-traitement, telle que l'optimiseur de seuil randomisé [64], sera explorée comme moyen possible d'obtenir de nouvelles améliorations en termes d'équité et de performances.

8. Conclusions

Dans cette étude, la question du biais dans les prédictions ML a été étudiée et une méthode a été développée basée sur la combinaison de variables protégées dans une nouvelle multicatégorie. En particulier, l'accent a été mis sur la question suggérée dans la littérature concernant le compromis biais-performance et sur la recherche d'une méthode pour atténuer ce compromis. La nouvelle approche multicatégorie proposée reflète l'identité multiforme des individus, reconnaissant l'interaction complexe des attributs qui définissent les scénarios du monde réel. Compte tenu du déséquilibre inhérent à cette multicatégorie, quatre méthodes d'échantillonnage adaptées à ces catégorisations complexes, plutôt que les étiquettes de classe traditionnelles, ont été développées. Afin d'appliquer un classificateur de base, des arbres de décision ont été formés et l'efficacité de ces méthodes a été évaluée à l'aide de trois ensembles de données souvent utilisés dans les études d'équité. Les performances des méthodes ont été comparées aux méthodes de base sans échantillonnage, en utilisant la précision, la macro F1, la différence de cotes égalisée (EOD) et la parité statistique (SP) comme mesures d'évaluation.

Les résultats des expériences indiquent que deux des techniques d'échantillonnage nouvellement développées – PC-SMOTE et PC-ADASYN – améliorent avec succès l'équité sans compromettre la précision. Remarquablement, dans certains cas, ces méthodes ont également amélioré la précision, fournissant ainsi des preuves contraires aux affirmations populaires selon lesquelles il existe un compromis entre équité et performance. Une analyse plus approfondie de l'impact de la profondeur maximale des arbres sur les performances du modèle a révélé que, même si l'augmentation de la profondeur augmente initialement la précision, elle conduit finalement à une baisse. À l' inverse, l'augmentation de la profondeur nuit à l'équité, soulignant le défi de concilier complexité et équité. Cependant, des profondeurs d'arbre optimales ont été identifiées, améliorant simultanément la précision et l'EOD, soulignant la possibilité d'atteindre l'équité sans sacrifier les performances.

En fin de compte, ces résultats remettent en question les notions dominantes d'un compromis implicite entre performance et équité dans la recherche sur l'atténuation des biais, suggérant que des stratégies d'atténuation des biais soigneusement conçues ont la capacité d'éviter ce compromis. Notre approche crée un nouveau précédent pour le développement d'algorithmes prédictifs plus équitables en redéfinissant la manière dont les attributs protégés sont utilisés dans la formation des modèles.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, GP et JS ; analyse formelle, GP et JS ; enquête, médecin généraliste; méthodologie, médecin généraliste; logiciel, médecin généraliste; supervision, JS; validation, GP et JS ; visualisation, médecin généraliste ; rédaction – ébauche originale, GP ; rédaction – révision et édition, JS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les ensembles de données et le code mis en œuvre dans ce travail de recherche ont été téléchargés sur https://github.com/horlahsunbo/New-folder (consulté le 10 juin 2024).

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Machine Translated by Google

Les références

1. Maina, IW ; Belton, TD ; Ginzberg, S. ; Singh, A. ; Johnson, TJ Une décennie d'étude des préjugés raciaux/ethniques implicites dans les soins de santé fournisseurs utilisant le test d'association implicite. Soc. Sci. Méd. 2018, 199, 219-229. [Référence croisée]
2. Salimi, B. ; Rodriguez, L. ; Howe, B. ; Suciu, D. Réparation causale de bases de données pour l'équité algorithmique. Dans Actes de la Conférence internationale 2019 sur la gestion des données, Amsterdam, Pays-Bas, 30 juin-5 juillet 2019 ; pp. 793-810.
3. Kordzadeh, N. ; Ghasemaghaei, M. Biais algorithmique : examen, synthèse et orientations futures de la recherche. EUR. J. Inf. Système. 2022, 31, 388-409. [Référence croisée]
4. Pessach, D. ; Shmueli, E. Une revue sur l'équité dans l'apprentissage automatique. Calcul ACM. Survivre. 2022, 55, 1–44. [Référence croisée]
5. Aghaei, S. ; Azizi, MJ; Vayanos, P. Apprendre des arbres de décision optimaux et équitables pour une prise de décision non discriminatoire. Proc. AAAI Conf. Artif. Intell. 2019, 33, 1418-1426. [Référence croisée]
6. Kamiran, F. ; Calders, T. Techniques de prétraitement des données pour la classification sans discrimination. Connaître. Inf. Système. 2012, 33, 1-33. [Référence croisée]
7. Calmon, F. ; Wei, D. ; Vinzamuri, B. ; Ramamurthy, KN ; Varshney, KR Prétraitement optimisé pour la prévention de la discrimination. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, Long Beach, Californie, États-Unis, 4-9 décembre 2017.
8. Shahbazi, N. ; Lin, Y. ; Asudeh, A. ; Jagadish, HV Biais de représentation dans les données : une enquête sur les techniques d'identification et de résolution. Calcul ACM. Survivre. 2023, 55, 1–39. [Référence croisée]
9. Chen, Z. ; Zhang, JM; Sarro, F. ; Harman, M. Une étude empirique complète des méthodes d'atténuation des biais pour l'apprentissage automatique classificateurs. ACM Trans. Logiciel. Ing. Méthode. 2023, 32, 1–30. [Référence croisée]
10. Perzynski, A. ; Berg, KA; Thomas, C. ; Cemballi, A. ; Forgeron, T. ; Shick, S. ; Gunzler, D. ; Sehgal, AR Discrimination raciale et facteurs économiques dans la délimitation des quartiers de l'Ohio. Bois Rév. Soc. Sci. Rés. Course 2023, 20, 293-309. [Référence croisée]
11. Steil, JP; Albright, L. ; Rugh, JS ; Massey, DS La structure sociale de la discrimination hypothécaire. Maison. Goujon. 2018, 33, 759-776. [Référence croisée]
12. Salgado, JF; Moscoso, S. ; García-Izquierdo, AL ; Anderson, NR Façonner des lieux de travail inclusifs grâce au dialogue social ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2017.
13. Leavy, S. ; Méaney, G. ; Wade, K. ; Greene, D. Atténuer les préjugés sexistes dans les ensembles de données d'apprentissage automatique. Dans Actes des biais et aspects sociaux dans la recherche et la recommandation : premier atelier international, BIAS 2020, Lisbonne, Portugal, 14 avril 2020 ; p. 12-26.
14. Hort, M. ; Chen, Z. ; Zhang, JM; Harman, M. ; Sarro, F. Atténuation des biais pour les classificateurs d'apprentissage automatique : une enquête complète. ACM J. Informatique responsable. 2023, 1, 1-52. [Référence croisée]
15. Fahsé, T. ; Huber, V. ; van Giffen, B. Gestion des préjugés dans les projets d'apprentissage automatique. Dans L'innovation grâce aux systèmes d'information : Volume II : Une collection des dernières recherches sur les questions technologiques ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2021 ; pp. 94-109.
16. Zhang, Z. ; Neill, DB identifiant un biais prédictif important dans les classificateurs. arXiv 2017, arXiv : 1611.08292. [Référence croisée]
17. Zheng, Z. ; Cai, Y. ; Li, Y. Méthode de suréchantillonnage pour une classification déséquilibrée. Calculer. Informer. 2015, 34, 1017-1037.
18. Chawla, Nevada ; Bowyer, KW; Hall, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE : Technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques. J.Artif. Intell. Rés. 2002, 16, 321-357. [Référence croisée]
19. Lui, H. ; Bai, Y. ; Garcia, EA; Li, S. ADASYN : Approche d'échantillonnage synthétique adaptative pour l'apprentissage déséquilibré. Dans Actes de la Conférence internationale conjointe de l'IEEE 2008 sur les réseaux de neurones (Congrès mondial de l'IEEE sur l'intelligence informatique), Hong Kong, Chine, 1er-8 juin 2008 ; pages 1322 à 1328.
20. Janssen, P. ; Sadowski, BM Bias in Algorithms : Sur le compromis entre précision et équité. Dans Actes de la 23e Conférence biennale de la Société internationale des télécommunications, Göteborg, Suède, 21-23 juin 2021.
21. Hardt, M. ; Prix, E. ; Srebro, N. Égalité des chances dans l'apprentissage supervisé. Dans les actes des avancées en matière neuronale Systèmes de traitement de l'information, Barcelone, Espagne, 5-10 décembre 2016.
22. Kamishima, T. ; Akaho, S. ; Asoh, H. ; Sakuma, J. Classificateur soucieux de l'équité avec régularisateur de suppression des préjugés. Dans Actes de l'apprentissage automatique et découverte des connaissances dans les bases de données : Conférence européenne, ECML PKDD 2012, Bristol, Royaume-Uni, 24-28 septembre 2012 ; p. 35-50.
23. Calders, T. ; Žliobaitė, I. Pourquoi des processus informatiques impartiaux peuvent conduire à des procédures de décision discriminantes. Dans Discrimination et confidentialité dans la société de l'information : exploration de données et profilage dans de grandes bases de données ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2013 ; p. 23-33.
24. Burt, A. Comment lutter contre la discrimination dans l'IA. Revue de Harvard business. 2020 Disponible en ligne : https://hbr.org/2020/08/how-to-fight-discrimination-in-ai (consulté le 12 juillet 2024).
25. Siegler, A. ; Admussen, W. Découvrir la discrimination raciale par la police. Université du Nord-Ouest. Loi Rév. 2021, 115, 987-1054.
26. Grabowicz, P. ; Perello, N. ; Mishra, A. Comment former des modèles qui ne propagent pas la discrimination ? Blog Equate et Machine Learning , Université du Massachusets, Amherst. 2022. Disponible en ligne : https://groups.cs.umass.edu/equate-ml/2022/04/07/how-to-train-models-that-do-not-propagate-discrimination/ (consulté le 12 juillet 2024).
27. Khani, F. ; Liang, P. De la discrimination dans l'apprentissage automatique à la discrimination dans le droit, partie 1 : Traitement disparate. Blog du laboratoire d'IA de Stanford . 2022. Disponible en ligne : https://ai.stanford.edu/blog/discrimination_in_ML_and_law/ (consulté le 12 juillet 2024).
28. Shahriari, K. ; Shahriari, M. Examen des normes IEEE – Conception éthique : une vision pour donner la priorité au bien-être humain grâce à l'intelligence artificielle et aux systèmes autonomes. Dans les actes de la Conférence internationale sur les technologies humanitaires (IHTC) de l'IEEE Canada, Toronto, ON, Canada, 21 et 22 juillet 2017 ; pp. 197-201.

Machine Translated by Google

29. Commission européenne ; Direction générale des réseaux de communication, du contenu et de la technologie. Lignes directrices éthiques pour une IA digne de confiance. Office des publications. 2019. Disponible en ligne : https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d39885 69-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/langue-fr/format-PDF/source-337437547 (consulté le 10 juin 2024)
30. Ebers, M. ; Hoch, VRS ; Rosenkranz, F. ; Ruschemeier, H. ; Steinrötter, B. La proposition de la Commission européenne pour une loi sur l'intelligence artificielle – Une évaluation critique par les membres de la Robotics and AI Law Society (RAILS). J 2021, 4, 589-603. [Référence croisée]
31. Hajian, S. ; Domingo-Ferrer, J. Une méthodologie pour la prévention de la discrimination directe et indirecte dans l'exploration de données. IEEETrans. Connaître. Ingénierie des données. 2012, 25, 1445-1459. [Référence croisée]
32. Poisson, B. ; Kun, J. ; Lelkes, A.D. Une approche basée sur la confiance pour équilibrer l'équité et l'exactitude. Dans les actes du SIAM 2016 Conférence internationale sur l'exploration de données, Miami, FL, États-Unis, 5-7 mai 2016 ; pp. 144-152.
33. Hajian, S. Prévention simultanée de la discrimination et protection de la vie privée dans la publication et l'exploration de données. arXiv 2013, arXiv : 1306.6805. [Référence croisée]
34. Sondeck, LP; Laurent, M. ; Frey, V. La métrique du taux de discrimination sémantique pour les mesures de confidentialité qui remet en question l' avantage de la t-proximité par rapport à la l-diversité. Dans Actes de la 14e Conférence internationale sur la sécurité et la cryptographie, Madrid, Espagne, 24-26 juillet 2017 ; Volume 6, pp. 285-294.
35. Ruggieri, S. Utilisation de l'anonymat de proximité pour contrôler la non-discrimination. Trans. Données privées. 2014, 2, 99-129.
36. Romano, Y. ; Bates, S. ; Candes, E. Atteindre des chances égalisées en rééchantillonnant les attributs sensibles. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, en ligne, 6-12 décembre 2020 ; pp. 361-371.
37. Peng, K. ; Chakraborty, J. ; Menzies, T. Fairmask : Une meilleure équité grâce à un rééquilibrage basé sur un modèle des attributs protégés. IEEETrans. Logiciel. Ing. 2022, 49, 2426-2439. [Référence croisée]
38. Dhar, P. ; Gleason, J. ; Roy, A. ; Castillo, CD ; Chellappa, R. PASS : Système de suppression d'attributs protégés pour atténuer les biais dans la reconnaissance faciale. Dans Actes de la conférence internationale IEEE/CVF sur la vision par ordinateur, Montréal, QC, Canada, 10-17 octobre 2021 ; pages 15087 à 15096.
39. Krasanakis, E. ; Spyromitros-Xioufis, E. ; Papadopoulos, S. ; Kompatsiaris, Y. Repondération sensible adaptative pour atténuer les biais dans la classification soucieuse de l'équité. Dans Actes de la conférence World Wide Web, Lyon, France, 23-27 avril 2018 ; pp. 853-862.
40. Ran˘ci´c, S. ; Radovanovic, S. ; Delibaši´c, B. Enquête sur les techniques de suréchantillonnage pour des modèles d'apprentissage automatique équitables. Dans Actes des systèmes d'aide à la décision XI : Systèmes, analyses et technologies d'aide à la décision en réponse à la gestion de crise mondiale : 7e Conférence internationale sur la technologie des systèmes d'aide à la décision, ICDSST 2021, Loughborough, Royaume-Uni, 26-28 mai 2021 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2021 ; pp. 110-123.
41. Yan, S. ; te Kao, H. ; Ferrara, E. Équilibrage de classes équitable : améliorer l'équité du modèle sans observer les attributs sensibles. Dans Actes de la 29e Conférence internationale de l'ACM sur la gestion de l'information et des connaissances, événement virtuel, Irlande, 19-23 octobre 2010 ; pages 1715-1724.
42. HuZhang, B. ; Lemoine, B. ; Mitchell, M. Atténuer les préjugés indésirables grâce à l'apprentissage contradictoire. Dans Actes de la conférence AAAI/ACM sur l'IA, l'éthique et la société, Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 2 et 3 février 2018 ; pp. 335-340.
43. Célis, LE; Huang, L. ; Keswani, V. ; Vishno, NK Classification avec contraintes d'équité : un méta-algorithme avec des garanties prouvables. Dans Actes de la Conférence sur l'équité, la responsabilité et la transparence, Atlanta, GA, États-Unis, 29-31 janvier 2019 ; pp. 319-328.
44. Zafar, MB; Valera, I. ; Rodriguez, MG; Gummadi, KP L'équité au-delà d'un traitement disparate et d'un impact disparate : apprendre la classification sans maltraitance disparate. Dans Actes de la 26e Conférence internationale sur le World Wide Web, Perth, Australie, 3-7 avril 2017 ; pages 1171 à 1180.
45. Agarwal, A. ; Beygelzimer, A. ; Dudik, M. ; Langford, J. ; Wallach, H. Une approche de réduction pour une classification équitable. Dans les actes de la Conférence internationale sur l'apprentissage automatique, Stockholm, Suède, 10-15 juillet 2018 ; pp. 60-69.
46. Lowy, A. ; Baharlouei, S. ; Pavan, R. ; Razaviyayn, M. ; Beirami, A. Un cadre d'optimisation stochastique pour une minimisation équitable des risques. Trans. Mach. Apprendre. Rés. 2022. [Référence croisée]
47. Spinelli, I. ; Scardapane, S. ; Hussein, A. ; Uncini, A. Fairdrop : Abandon de bord biaisé pour améliorer l'équité dans l'apprentissage de la représentation graphique. IEEETrans. Artif. Intell. 2021, 3, 344-354. [Référence croisée]
48. Hort, M. ; Zhang, JM; Sarro, F. ; Harman, M. Fairea : Une approche de mutation comportementale modèle pour évaluer les méthodes d'atténuation des biais. Dans les actes de la 29e réunion conjointe de l'ACM sur la conférence et le symposium européens sur le génie logiciel sur les fondements du génie logiciel, Athènes, Grèce, 23-28 août 2012 ; pp. 994-1006.
49. Bhaskaruni, D. ; Hein.; Lan, C. Améliorer l'équité des prévisions via un ensemble de modèles. Dans les actes de la 31e conférence internationale de l'IEEE sur les outils dotés d'intelligence artificielle (ICTAI), Portland, OR, États-Unis, 4-6 novembre 2019 ; pages 1810-1814.
50. Iosifidis, V. ; Fétahu, B. ; Ntoutsi, E. Fae : Un cadre d'ensemble soucieux de l'équité. Dans Actes de la Conférence internationale de l'IEEE sur le Big Data (Big Data), Los Angeles, Californie, États-Unis, 9-12 décembre 2019 ; pages 1375 à 1380.
51. Dwork, C. ; Hardt, M. ; Pitassi, T. ; Reingold, O. ; Zemel, R. L'équité par la sensibilisation. Dans Actes de la 3e Innovations en Conférence sur l'informatique théorique, Cambridge, MA, États-Unis, 8-10 janvier 2012 ; pp. 214-226.
52. Pleiss, G. ; Raghavan, M. ; Wu, F. ; Kleinberg, J. ; Weinberger, KQ Sur l'équité et l'étalonnage. Dans Actes des Avances en Neural Information Processing Systems, Long Beach, Californie, États-Unis, 4-8 décembre 2017.
53. Karimi-Haghighi, M. ; Castillo, C. Améliorer un outil de prédiction de la récidive grâce à l'apprentissage automatique : efficacité et équité algorithmique. Dans Actes de la dix-huitième Conférence internationale sur l'intelligence artificielle et le droit, São Paulo, Brésil, 21-25 juin 2017 ; pp. 210-214.

Machine Translated by Google

54. Friedler, SA; Scheidegger, C. ; Venkatasubramanian, S. L'(im)possibilité de l'équité : différents systèmes de valeurs nécessitent différents mécanismes pour une prise de décision équitable. Commun. ACM 2021, 64, 136-143. [Référence croisée]
55. García, V. ; Sánchez, JS; Mollineda, RA Sur l'efficacité des méthodes de prétraitement face à différents niveaux de déséquilibre de classe. Système basé sur les connaissances. 2012, 25, 13-21. [Référence croisée]
56. Breiman, L. Arbres de classification et de régression ; Routledge : Londres, Royaume-Uni, 2017.
57. Pedregosa, F. ; Varoquaux, G. ; Gramfort, A. ; Michel, V. ; Thirion, B. ; Grisel, O. ; Blondel, M. ; Prettenhofer, P. ; Weiss, R. ; Dubourg, V. ; et coll. Scikit-learn : apprentissage automatique en Python. J. Mach. Apprendre. Rés. 2011, 12, 2825-2830.
58. Kelly, M. ; Longjohn, R. ; Nottingham, K. Le référentiel d'apprentissage automatique UCI. 2024. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu (consulté le 10 juin 2024).
59. Becker, B. ; Kohavi, R. Adulte. Référentiel d'apprentissage automatique UCI. 1996. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu/dataset/2/adulte (consulté le 10 juin 2024). [Référence croisée]
60. Hofmann, H. ; Statlog (données de crédit allemandes). Référentiel d'apprentissage automatique UCI. 1994. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu/dataset/144/statlog+allemand+crédit+data (consulté le 10 juin 2024). [Référence croisée]
61. Dressel, J. ; Farid, H. L'exactitude, l'équité et les limites de la prévision de la récidive. Sci. Av. 2018, 4, eaao5580. [Référence croisée]
62. Huang, Q. ; Mao, J. ; Liu, Y. Un algorithme de recherche de grille amélioré pour l'optimisation des paramètres SVR. Dans Actes de la 14e Conférence internationale de l'IEEE 2012 sur les technologies de communication, Chengdu, Chine, 9-11 novembre 2012 ; pp. 1022-1026.
63. Caton, S. ; Haas, C. L'équité dans l'apprentissage automatique : une enquête. Calcul ACM. Survivre. 2023, 56, 1–38. [Référence croisée]
64. Alabdulmohsin, I. ; Lucic, M. Un algorithme presque optimal pour débiaiser les modèles d'apprentissage automatique formés. Dans les actes du 35e conférence sur les systèmes de traitement de l'information neuronale, en ligne, du 6 au 14 décembre 2021.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Traitement et distribution sécurisés des données gérées en mode privé Système de fichiers interplanétaire utilisant des preuves sans connaissance

Kyohei Shibano 1,*, Kensuke Ito [1], Changhee Han [2], Tsz Tat Chu [2], Wataru Ozaki [2] et Gento Mogi [1]

[1] Département de gestion technologique pour l'innovation, École d'ingénierie, Université de Tokyo, Tokyo 113-8656, Japon Callisto Inc.,
[2] Tokyo 171-0022, Japon *
Correspondance : shibano@tmi.tu-tokyo.ac.jp

Résumé : Dans cette étude, une nouvelle méthode de partage de données est proposée qui utilise un système de fichiers interplanétaire privé – un système de stockage décentralisé exploité au sein d'un réseau fermé – pour distribuer des données à des entités externes tout en rendant leur authenticité vérifiable. Parmi les deux modes de fonctionnement de l'IPFS, public et privé, cette étude se concentre sur la méthode d'utilisation de l'IPFS privé. L'IPFS privé n'est pas ouvert au grand public ; bien qu'elle présente un risque de falsification des données lors de la distribution des données à des parties externes, la méthode proposée garantit l'authenticité des données reçues. En particulier, cette méthode applique un type de preuve à connaissance nulle, à savoir le protocole Groth16 de zk-SNARKs, pour garantir que les données correspondent à l'identifiant de contenu dans un IPFS privé. De plus, le nom du destinataire est intégré aux données distribuées pour empêcher toute distribution secondaire non autorisée. Les expériences ont confirmé l'efficacité de la méthode proposée pour une taille de données d'image allant jusqu'à 120 × 120 p
Dans les études futures, la méthode proposée sera appliquée à des types de données plus volumineux et plus diversifiés.

Mots clés : IPFS ; preuve de connaissance nulle ; Circom; zk-SNARK ; IPFS privés ; distribution de données ; traitement de l'information ; sécurité des données

check for updates

Citation : Shibano, K. ; Ito, K. ; Han, C. ; Chu, TT ; Ozaki, W. ; Mogi, G. Traitement et distribution sécurisés des données gérées sur un système de fichiers interplanétaire privé à l'aide de Zero-Knowledge Preuves. Électronique 2024, 13, 3025. https://doi.org/10.3390/électronique13153025

Rédactrice académique : Aryya Gangopadhyay

Reçu : 13 juin 2024
Révisé : 14 juillet 2024
Accepté : 20 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les systèmes décentralisés sont robustes car ils ne disposent pas d'un point de défaillance unique ; par conséquent, ils sont largement appliqués dans les secteurs d'entreprise, notamment les cryptomonnaies, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les services financiers et l'identité numérique. Pour stocker des données de grande taille telles que des images , ces systèmes nécessitent des fonctions de stockage intrinsèquement décentralisées. La blockchain, couramment utilisée conjointement, gère généralement des données de plus petite taille telles que les historiques de transactions et fonctionne comme une base de données de grand livre. L'InterPlanetary File System (IPFS) est un système de stockage décentralisé de premier plan qui stocke les données sur plusieurs nœuds pour améliorer la disponibilité des données. L'IPFS comporte deux variantes : l'IPFS public, dans lequel les données peuvent être stockées par n'importe quel utilisateur avec un accès illimité, et l'IPFS privé, dans lequel un réseau fermé accessible uniquement au sein d'organisations ou de groupes spécifiques est établi, offrant une confidentialité et une sécurité améliorées .

Lors du stockage de données dans IPFS, il est crucial de comprendre les différences entre IPFS public et IPFS privé. L'IPFS public permet à quiconque d'accéder aux données, tandis que l'IPFS privé n'est accessible qu'au sein d'organisations ou de groupes spécifiques, améliorant ainsi la confidentialité et la sécurité.
Lors du stockage d'informations sensibles, telles que des données confidentielles, dans un IPFS public, l'application d'un système de cryptage approprié est essentielle pour garantir la protection des données. En revanche, l'IPFS privé offre une plus grande sécurité pour le stockage des données, car il n'est accessible qu'au sein d'un réseau fermé.

En particulier pour les organisations telles que les entreprises ou les établissements de santé, le stockage de données dans un IPFS public, malgré l'utilisation de technologies de cryptage puissantes, comporte des risques inhérents. De plus, le risque de fuites de données dues à des erreurs opérationnelles existe de manière persistante dans de tels cas ; bien que les données soient cryptées, elles sont exposées au monde entier, ce qui les rend vulnérables aux attaques par force brute et à d'autres menaces de sécurité.

Machine Translated by Google

Concernant l'accessibilité, l'IPFS public permet aux utilisateurs généraux d'accéder et de récupérer directement données. Cependant, dans les IPFS privés, les données doivent être reçues des membres de l'organisation ou groupe constituant le réseau. Au cours de ce processus, si les données sont falsifiées, les utilisateurs peuvent alors incapable de le détecter. Par conséquent, faire confiance aux intermédiaires chargés du traitement des données le transfert devient alors obligatoire. Pour résoudre le problème de confiance susmentionné, un nouveau un procédé est proposé ici pour distribuer des données stockées dans un IPFS privé à des entités externes tout en rendant son authenticité vérifiable. Le protocole Groth16 [1] des zk-SNARK, un type de ZKP, est appliqué aux données stockées dans un IPFS privé pour garantir l'authenticité des données. De plus, les informations du destinataire sont intégrées dans les données distribuées pour empêcher distribution secondaire non autorisée. La méthode proposée de partage de données est importante car il est adapté au cas IPFS privé.

Les différences sur plusieurs aspects, notamment la sécurité et l'accessibilité, lors du stockage les données dans l'IPFS public et l'IPFS privé au sein du domaine de l'entreprise sont résumées dans Tableau 1. Cette étude propose des solutions aux menaces associées aux IPFS privés.

Tableau 1. Comparaison entre IPFS publics et privés dans le domaine de l'entreprise.

	IPFS publics	IPFS privé
Modèle de confiance	Sans confiance	Nécessite une confiance dans le groupe opérationnel
Restrictions d'accès	Accessible à tous	Accessible uniquement au sein du groupe opérationnel
Risque de fuite de données	Risque constant de fuite dû à une erreur de l'utilisateur	Faible risque de fuite au sein d'un réseau fermé
Traitement des informations confidentielles Information	Nécessite un cryptage approprié	Les données stockées dans IPFS ne nécessitent pas de cryptage de haut niveau ; il y a un point de confiance lors de la transmission de données aux utilisateurs
Risque d'attaque par force brute toujours présent		Faible
Méthode de récupération des données	Accès direct par les utilisateurs	Données reçues des membres de l'organisation ou du groupe
Des menaces	Nécessite un cryptage qui empêche le décryptage par des utilisateurs non autorisés	Il existe un risque de falsification lors du transfert de données aux utilisateurs.

Le reste de cet article est organisé comme suit. La section 2 présente les précédents recherche. La section 3 décrit les technologies fondamentales, à savoir ZKP et zk-SNARK. La section 4 décrit la structure de la méthode proposée, tandis que la section 5 décrit les applications potentielles de cette méthode. La section 6 présente la mise en œuvre de cette méthode, tandis que la section 7 discute des expériences réalisées pour vérifier l'efficacité du mise en œuvre. La section 8 présente une discussion des résultats expérimentaux, tandis que la section 9 présente les conclusions du document et un aperçu des défis futurs.

2. Études connexes

Les systèmes décentralisés existants utilisent IPFS, notamment en combinaison avec la blockchain technologie. Kumar et coll. [2] ont proposé une méthode de gestion sécurisée des données médicales en intégrer IPFS à une blockchain. Azbeg et coll. [3] ont spécifiquement suggéré un système qui données médicales gérées et stockées à l'aide d'IPFS privés et d'une blockchain autorisée par utiliser le recryptage par proxy pour garantir un décryptage sécurisé par des médecins désignés. Lorsqu'un Le médecin reçoit certaines données d'un patient, il obtient les données recryptées via un hôpital. Hossan et coll. [4] ont également proposé un système pour enregistrer en toute sécurité les informations pour le covoiturage services utilisant IPFS et une blockchain privée.

En se concentrant sur le contrôle de la distribution des données gérées par IPFS, Lin et al. [5] a proposé un système de protection des données privées utilisant un IPFS amélioré combiné à un blockchain. Ce système a enregistré les métadonnées des fichiers et accédé aux autorisations sur la blockchain, permettant aux utilisateurs de contrôler le partage de fichiers. De plus, le système a mis en œuvre des fonctionnalités de gestion efficaces à l'aide de contrats intelligents, améliorant ainsi la sécurité et la gestion des données.

Machine Translated by Google

la flexibilité. Battah et coll. [6] ont développé un système utilisant l'authentification multipartite (MPA), le rechiffrement par proxy et les contrats intelligents sur une blockchain pour le contrôle d'accès décentralisé aux données cryptées stockées dans IPFS. Huang et coll. [7] ont introduit un proxy IPFS de confiance pour réaliser le contrôle d'accès et la gestion des clés de groupe pour les données cryptées stockées dans IPFS. Sun et coll. [8] ont proposé un système qui permettait uniquement aux individus possédant les attributs appropriés de déchiffrer les données cryptées stockées dans IPFS à l'aide d'un système de cryptage basé sur les attributs de politique de texte chiffré, facilitant ainsi une gestion efficace des informations médicales. Kang et coll. [9] ont permis la distribution de données gérées à l'aide d'un IPFS privé et d'une blockchain privée à des utilisateurs externes utilisant un réseau de données nommé (NDN). De plus, Uddin et al. [10] ont proposé un système de partage de fichiers utilisant la technologie IPFS et d'infrastructure à clé publique (PKI) sans nécessiter un tiers de confiance.

Plusieurs études ont utilisé ZKP pour la distribution de données. Par exemple, Li et al. [11] ont proposé un système de gestion du trafic préservant la confidentialité qui combinait des preuves non interactives de portée de connaissance nulle avec une blockchain. Un prototype utilisant Hyperledger Fabric et Hyperledger Ursa répondait aux exigences de confidentialité des données pour la gestion du trafic en temp

Cette étude propose une méthode pour traiter et distribuer de manière appropriée les données gérées au sein d'IPFS privés aux utilisateurs extérieurs au réseau, offrant ainsi une approche différente de celles proposées dans les études précédentes. Certaines études ont adopté le recryptage proxy comme méthode appropriée pour le stockage et la distribution de données dans IPFS [3,6]. Grâce à cette méthode, les données distribuées peuvent être rechiffrées pour être déchiffrées avec la clé privée du destinataire. De plus, lors du stockage de données dans IPFS, l'enregistrement de la valeur de hachage des données pré-chiffrées sur la blockchain permet aux destinataires de vérifier l'exactitude de leurs données reçues après décryptage. Cependant, cette méthode ne peut pas gérer les cas dans lesquels des données sont traitées, comme l'intégration du nom du destinataire dans les données décryptées, comme dans cette étude.

3. Zero-Knowledge Proof ZKP

est un protocole cryptographique qui permet à un prouveur de prouver la validité d'une proposition à un vérificateur sans divulguer aucune information supplémentaire autre que la validité de la proposition. La proposition de cette étude est que les données fournies à une entité externe sont générées sur la base d'un CID donné. Notre objectif est de permettre à un membre d'IPFS privé (preuve) de prouver cette proposition à une entité externe (vérificateur en tant que destinataire des données) sans divulguer aucune autre information importante (telle que les droits d'accès IPFS et les clés de cryptage).

ZKP, en particulier le protocole Groth16 des zk-SNARK utilisé dans cette étude, commence par une configuration fiable dans laquelle les deux parties établissent des paramètres publics cruciaux pour la génération et la vérification sécurisées des preuves. Dans le schéma ZKP, nous générons d'abord un circuit qui décrit le processus pour lequel une preuve est destinée. Le circuit comprend les conditions à vérifier comme l'existence d'un CID. Grâce au système ZKP, des clés cryptographiques, en particulier une clé de preuve et une clé de vérification, sont créées. Ces clés sont cruciales pour créer une preuve du circuit et sa vérification. À l'aide de la clé de preuve et des données d'entrée, le prouveur génère une preuve qui révèle la validité des données de sortie par rapport aux conditions spécifiées dans le circuit. Le vérificateur utilise ensuite la clé de vérification pour vérifier la preuve et les données de sortie. Si la preuve est valide, cela confirme l'intégrité des données sans exposer aucune information sous-jacente.

Dans cette étude, le traitement Groth16 est effectué à l'aide de circom [12,13] et snarkjs [14]. Le flux du processus est résumé dans la figure 1.

zk-SNARKs est utilisé en raison de sa nature non interactive et de son efficacité, qui sont particulièrement avantageuses pour les systèmes utilisant des contrats intelligents en raison des faibles coûts de calcul pour vérifier la preuve. De plus, zk-SNARKs est connu pour ses exigences de calcul élevées et la nécessité de spécifications PC avancées. Par exemple, dans l'une des applications représentatives de zk-SNARK, Zcash [15], le processus de génération de preuve prend plus d'une demi-minute pour une seule transaction anonyme [16].

Machine Translated by Google

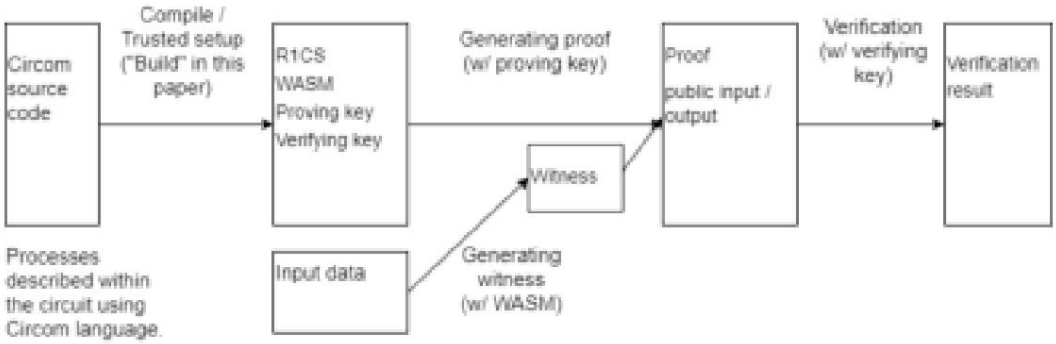


Figure 1. Preuve de connaissance nulle utilisant Circom.

4. Système proposé

La figure 2 présente un aperçu du système proposé.

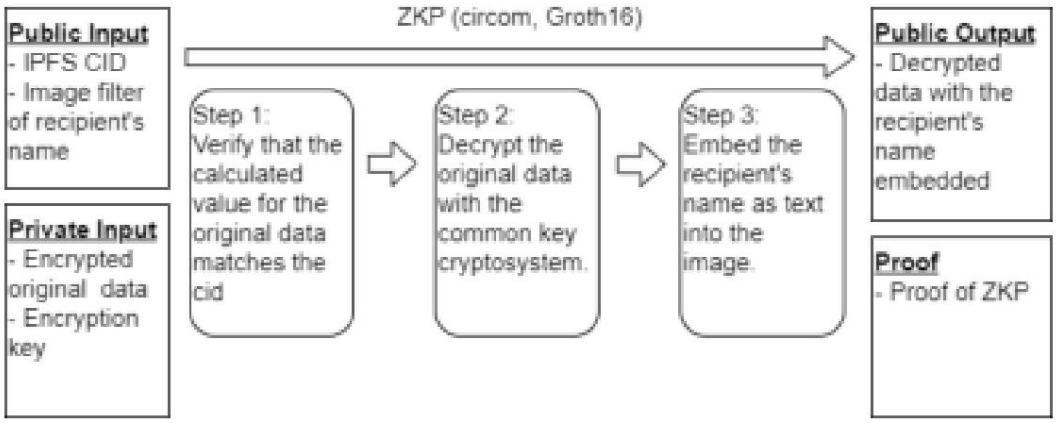


Figure 2. Flux de processus de ZKP : un exemple de traitement de données d'image.

Ici, nous faisons les hypothèses suivantes : • L'IPFS privé est géré par un nombre limité de membres. • Les données sont stockées dans IPFS dans un format crypté à l'aide d'une cryptographie à clé symétrique. • La clé de cryptage est exclusivement détenue par une personne physique parmi les membres, c'est-à-dire un administrateur.

Le système proposé facilite la création d'une preuve ZKP à travers le circuit par le membre détenteur de la clé de chiffrement (équivalent à un administrateur). Les entrées et sorties (autres que les preuves) de ce processus sont les suivantes : • Entrée publique : – CID des données chiffrées originales ; – Un filtre pour intégrer le nom du destinataire dans les données ; • Entrée privée : – Données originales cryptées ; - Clé de cryptage; • Sortir:

– Données décryptées avec le nom du destinataire intégré.

Notez que l'implémentation optimisée pour ZK (Section 6.1) ajoute plus d'informations à la contribution du public. En particulier, le processus interne de ZKP implique les étapes suivantes : 1. Calculer le CID des données chiffrées d'origine pour vérifier une correspondance avec le code d CID enregistré.

Machine Translated by Google

2. Décryptage des données originales à l'aide d'une cryptographie à clé symétrique.
3. Intégration du nom du destinataire dans les données brutes de l'image décryptée en fonction du filtre fournies dans la contribution du public.

Dans le système proposé, nous ne nous concentrons pas uniquement sur les données d'image, mais les utilisons comme exemples de données pour vérifier l'applicabilité du schéma proposé. Les filtres sont utilisés pour améliorer l'efficacité du traitement à l'intérieur du circuit. Comme l'intégration des données de nom à l'intérieur du circuit nécessite des calculs intensifs, une partie considérable du traitement de l'image est effectuée à l'avance à l'extérieur du circuit et un filtre est créé. À l'aide d'une entrée et d'une preuve publiques, le destinataire peut vérifier que les données déchiffrées (c'est-à-dire la sortie) avec leur nom intégré sont générées à partir des données originales (contenues dans l'entrée privée) gérées avec le CID. Le destinataire peut vérifier auprès d'au moins un membre du réseau pour confirmer l'existence du CID dans l'IPFS privé.

En résumé, le processus susmentionné permet au destinataire de vérifier le reçu données en effectuant les tâches suivantes :

- vérifier que les données reçues ont été générées à partir des données gérées avec le CID de IPFS privé,
- confirmer à l'aide de la preuve que l'ensemble du processus a été correctement réalisé sans connaître directement les données chiffrées ou la clé de chiffrement, et • vérifier que le CID existe spécifiquement au sein de l'IPFS privé en interrogeant au moins un membre du réseau.

La nouveauté du système proposé est qu'il permet de vérifier l'authenticité des données en faisant confiance à au moins un membre du réseau même si le destinataire ne contrôle pas la clé de cryptage. (Il est naturel que le destinataire fasse confiance à au moins un membre d'un système multimembre particulier. Si aucun des membres ne peut faire confiance, il y aura alors une incitation marginale à recevoir des données gérées par ce réseau).

5. Applications potentielles Dans

l'industrie médicale, les données de diagnostic des patients sont gérées dans plusieurs établissements médicaux. Grâce au système proposé, les patients peuvent vérifier si les données qu'ils reçoivent sont effectivement gérées dans un IPFS privé pour garantir leur authenticité. Une plateforme tout-en-un est également proposée ici pour la recherche et le développement de l'apprentissage automatique avec des images médicales [17]. Sur cette plateforme, les images médicales anonymisées sont gérées dans des IPFS privés exploités par un groupe d'institutions médicales. Le système permet aux chercheurs en apprentissage automatique, externes au réseau, de vérifier si les données d'image sont effectivement gérées dans l'IPFS privé. De plus, en intégrant les informations sur les chercheurs en apprentissage automatique dans les données d'images, les établissements médicaux peuvent atténuer le risque de distribution secondaire.

Si l'application ne se limite pas à l'intégration du nom du destinataire, les applications potentielles du système proposé peuvent être encore étendues. Par exemple, considérons un scénario dans lequel une entreprise spécifique établit un IPFS privé pour partager des documents confidentiels entre les sociétés de son groupe. Si les données des salariés sont incluses, alors dissimuler les données privées et les diffuser à des entités externes permet à ces entités de confirmer l' association des salariés avec l'entreprise tout en garantissant la protection de leur vie privée. De plus, supposons qu'une université ait mis en place un IPFS privé pour permettre uniquement au personnel académique d'accéder aux données sur les performances des étudiants. Dans ce cas, les étudiants peuvent vérifier que leurs données de performances reçues sont véritablement gérées dans l'IPFS privé.

Ainsi, le système proposé prend en charge un cas hybride : distribuer des données internes à entités externes spécifiques si nécessaire – répandues dans les contextes du monde réel.

6. Implémentation Le

système proposé a été implémenté pour traiter les données d'image à l'aide de circom, un outil renommé spécialisé dans la construction de circuits zk-SNARKs. Circom permet la description des processus informatiques au sein d'un circuit en utilisant son langage unique, et le

Machine Translated by Google

Le fichier exécutable généré après compilation peut être invoqué via la bibliothèque JavaScript, snarkjs. Cet agencement permet de décrire les processus de circuit dans circom, et les tests de traitement externe et d'exactitude des circuits sont effectués à l'aide de JavaScript. Pour les zk-SNARK schéma, Groth16 a été utilisé ; il est connu pour sa vitesse d'exécution relativement plus rapide que les autres Schéma zk-SNARKs.

En particulier, nous avons travaillé sur deux types d'implémentations pour les données d'images : un standard une implémentation utilisant des techniques cryptographiques générales et une implémentation optimisée pour ZK utilisant des techniques cryptographiques compatibles avec ZK pour réduire le temps de calcul du circuit. Ces implémentations ont été utilisées pour comparer les temps de calcul requis. Les circuits ZKP nécessitent un temps de calcul considérablement important, même pour les calculs qui peuvent être facilement géré par un logiciel informatique (cela est particulièrement visible lorsqu'il s'agit de données d'images). L'efficacité informatique est donc cruciale pour une utilisation pratique.

6.1. Implémentation standard

La section 4 décrit l'entrée des données dans le circuit. Pour simplifier le circuit traitement, les données cryptées d'origine ont été formatées en tant que données d'image bitmap conformes aux normes OS/2. Les 54 premiers octets des données d'image stockent des informations telles que le largeur, hauteur et profondeur de couleur des images [18]. La profondeur de couleur est de 8 bits et chaque couleur Le composant en RVB se voit attribuer un octet, ce qui donne une représentation de 3 octets par pixel.

Dans un premier temps, le système vérifie si les données cryptées, saisies en tant qu'entrée privée, correspond au CID fourni en tant qu'entrée publique. S'ils ne correspondent pas, le système signifie une erreur et les données d'image émises en sortie sont une séquence d'octets où toutes les valeurs sont 0x00. CID sert de mécanisme crucial pour identifier les fichiers de manière unique et efficace récupérer des données depuis IPFS. CID a deux versions : V0 et V1 [19]. Ici, le plus flexible la version CID V1 a été utilisée. CID inclut un hachage des données respectives, garantissant différentes les données auront des CID différents. Généralement, le CID V1 est calculé à l'aide du hachage SHA256. fonction, et l'implémentation standard utilise SHA256 pour calculer le CID.

La structure des données du CID V1 est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2. Structure de données CID V1.

Position de l'octet	Description	Valeur dans la mise en œuvre
Premier octet	Préfixe multibase	0x01
Deuxième octet	de la version CID	0x55 : données brutes
Troisième octet	Identifiant de la fonction de hachage	0x12 : SHA-256
Quatrième octet	Longueur de hachage	0x20 : 32 octets
À partir du cinquième octet	Valeur de hachage	Valeur de hachage SHA-256 (32 octets)

Le codage du CID est effectué en Base32. Base32 code une séquence d'octets construit sur la base de cette structure pour générer CID.

À l'intérieur du circuit, la valeur CID saisie est décodée de Base32 et du système vérifie si la valeur de hachage extraite correspond au hachage SHA256 calculé à partir du données cryptées.

Par la suite, les données cryptées sont décryptées. AES-CTR est utilisé comme cryptage algorithme, qui est un type de cryptographie à clé symétrique. Le cryptage AES-CTR et le décryptage dans circcom-chacha20 [20] a été utilisé. Pour décrypter le cryptage AES-CTR, la clé de chiffrement et le nom occasionnel utilisé lors du chiffrement sont requis. Ils sont entrés dans le circuit sous forme de clé de 256 bits et de nom occasionnel de 128 bits, respectivement, en tant qu'entrées privées. De plus, AES-CTR gère des volumes de données par multiples de 16. Par conséquent, si la longueur de l'image les données avant le cryptage ne sont pas un multiple de 16, des zéros (0x00) sont ajoutés à la fin des données pour l'aligner sur cette exigence.

Enfin, un filtre est appliqué aux données décryptées pour intégrer le nom du destinataire. Implémenter l'intégration de texte directement dans le circuit peut augmenter considérablement la charge de calcul ; par conséquent, un filtre est créé à l'extérieur du circuit qui effectue un travail considérable

Machine Translated by Google

partie du traitement de l'image à l'avance. La police utilisée pour le texte représentant le nom du destinataire est la police Misaki [21]. Le filtre est ensuite utilisé pour rationaliser le traitement à l'intérieur du circuit. Le filtre est une liste de nombres où les valeurs de 0 à 255 sont utilisées pour changer la couleur de chaque pixel au cas où il diffère de celle des pixels de l'image originale ; de plus, une valeur de 300 indique que la couleur doit rester telle que dans l'image originale. Ce filtre représente la position sur l'image où le nom du destinataire doit être inséré.

À l'intérieur du circuit, les couleurs des pixels spécifiées dans les données BMP décryptées sont modifiées en fonction de ce filtre.

6.2. Implémentation optimisée par ZK

L'implémentation optimisée pour ZK modifie la fonction de hachage, la technologie de cryptage et le traitement en circuit vers l'implémentation de cryptage standard compatible avec ZK. Cette implémentation améliore l'efficacité du calcul et n'évalue pas la différence de vitesses de calcul entre le chiffrement compatible ZK et le chiffrement général. Par conséquent, le traitement en circuit a également été modifié.

Le hachage Poséidon [22] a été utilisé comme fonction de hachage pour calculer le CID. Notamment, l'utilisation du hachage Poséidon pour les CID n'est pas officiellement prise en charge ; par conséquent, il a été développé spécifiquement pour cette étude. Bien que SHA256 soit couramment utilisé dans les calculs généraux, il nécessite un temps de calcul considérable au sein des circuits ZKP. Le hachage Poséidon est implémenté dans circcom et JavaScript (circomlib [23] et circcomlibjs [24], respectivement). Il est calculé sur un corps fini avec un ordre premier et peut accepter jusqu'à 16 variables d'entr L'ordre utilisé est inférieur au maximum de 32 octets mais supérieur au maximum de 31 octets. Cela indique que chacune des 16 entrées doit contenir des données ne dépassant pas cet ordre. Dans cette implémentation, les données ciblées pour le calcul de hachage sont divisées en segments de 31 octets comme valeurs d'entrée. Si la division dépasse 16 segments, le hachage Poséidon est calculé pour les 16 premiers segments. Ce résultat est ajouté aux 15 segments de données suivants pour une entrée de hachage Poséidon ultérieure. Le processus est répété jusqu'à ce que toutes les données d'entrée soient utilisées pour le calcul du hachage. Sur le plan informatique, si l'entrée finale ne complète pas 16 segments, les entrées manquantes sont mises à zéro pour garantir que le calcul implique toujours 16 entrées.

Lors de la génération du CID à partir de la valeur de hachage Poséidon, la séquence d'octets doit suivre la structure de données CID V1 et être codée en Base32. Cependant, pour réduire davantage le temps de calcul, cette implémentation omet le codage Base32 et utilise directement la valeur de hachage Poséidon comme substitut au CID. La division des données d'entrée en 16 segments au sein du circuit nécessite beaucoup de calculs ; par conséquent, cette division est effectuée en dehors du circuit et donnée en entrée. Dans ce cas, la séquence d'octets de données cryptées et la liste de valeurs pour calculer le hachage Poséidon sont fournies en tant qu'entrées publiques, permettant de vérifier que les deux ensembles de données représentent les mêmes informations. Les destinataires peuvent confirmer que les données calculées pour le hachage Poséidon et les données décryptées dans le circuit sont identiques en convertissant et en vérifiant mutuellement ces deux valeurs. Dans ce cas, étant donné que les utilisateurs peuvent obtenir les données décryptées, il existe un problème de fuite de mot de passe via des attaques par force brute ou d'autres moyens.

Pour la technologie de cryptage, nous avons adopté le cryptage Poséidon [25] au lieu du cryptage AES- CTR. Le chiffrement Poséidon, implémenté dans Circom et TypeScript (poseidon- cryptage-circcom2 [26]), implique de recevoir la clé publique du destinataire, de générer une clé commune et d'assurer un chiffrement et un déchiffrement sécurisés par les deux parties. Dans ce cas cependant, une clé commune est directement générée et utilisée pour le chiffrement et le déchiffrement. Le circuit est doté de deux valeurs représentant les coordonnées d'une courbe elliptique et d'une valeur occasionnelle comme entrées privées pour le chiffrement. De plus, le filtre est implémenté de la même manière que dans l'implémentation standard.

7. Évaluation

Nous avons créé un exemple de programme basé sur les implémentations susmentionnées qui utilise circom pour décrire le circuit et utilise snarkjs pour exécuter le circuit et vérifier

Machine Translated by Google

preuves. Comme bibliothèques cryptographiques, circom-chacha20 [20], circcomlib [23], circcomlibjs [24], et poseidon-encryption-circom2 [26] ont été utilisés.

Les implémentations standard et optimisées pour ZK ont été implémentées pour chaque circuit, et leurs temps de calcul ont été comparés lors de l'exécution. Images bitmap blanches étaient les images cibles, et les expériences ont été menées en utilisant la lettre « A » comme caractère incorporé. Comme l'intégration d'un nombre quelconque de caractères ne modifie pas le traitement par le filtre, intégrant un seul caractère permettant de comparer les temps de calcul. De plus, nous avons fait varier la taille des images pour mesurer les temps d'exécution de chaque circuit. Les tailles utilisées étaient 10 × 10, 15 × 15, 30 × 15, 30 × 30, 60 × 30, 60 × 60, 120 × 60, 120 × 120, et 180 × 120 pixels. L'environnement d'exécution était Windows 11 avec un Ryzen 9 3950X CPU et 128 Go de RAM fonctionnant sous Ubuntu 22.04 dans un environnement WSL2.

La figure 3 montre un exemple d'image générée par le circuit, spécifiquement pour le pixel 60 × 30. taille en utilisant l'implémentation optimisée pour ZK. Les résultats pour chaque taille d'image sont présentés dans le tableau 3, où les contraintes non linéaires indiquent le nombre de contraintes non linéaires dans le circuit, le temps de construction est le temps nécessaire pour compiler circom et produire le circuit, et la preuve Le temps de génération est le temps nécessaire pour générer des preuves à l'aide du circuit. Comme l'implémentation standard utilise le cryptage AES-CTR, les données avec 0x00 sont ajoutées à la fin pour garantir que le la taille d'entrée est un multiple de 16.

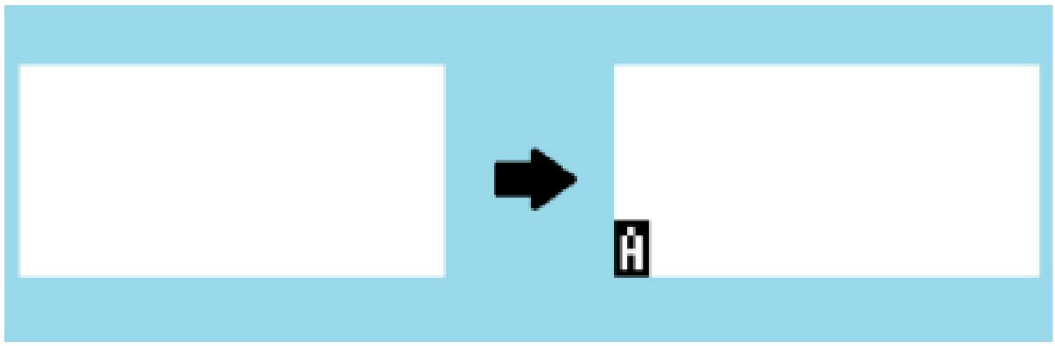


Figure 3. Une image générée par le circuit pour une taille d'image de 60 × 30 par une implémentation optimisée par ZK.

Tableau 3. Comparaison du temps d'exécution du circuit.

	Pixels	Taille de l'image [Octet]	Non linéaire Contraintes	Temps de construction [MS]	Génération de preuve Temps [ms]
Standard					
	10 × 10	384	558 341 1	668 220 1	14 377
	15 × 15	784	095 292 1	316 666 1	25 545
	30 × 15	1440	980 688 3	696 370 3	35 161
	30 × 30	2816	867 989 7	657 578 7	65 785
	60 × 30	5456	453 300	864 583	126 262
Optimisé pour ZK					
	10 × 10	376	35 407	128 979	3076
	15 × 15	775	72 725	173 210	4032
	30 × 15	1 435	134 663	275 630	5900
	30 × 30	2 815	263 450	470 872	9733
	60 × 30	5 455	509 375 1	850 612 1	17 571
	60 × 60	10 855	013 483 4	257 418 6	29 044
	120 × 120	43 255	036 913	754 928	96 580

Dans les implémentations standard et optimisées pour ZK pour 60 × 60 pixels et 180 × 120 pixels tailles d'image, le système a manqué de mémoire et le calcul n'a pas pu être terminé. Dans l'implémentation optimisée pour ZK, le nombre de contraintes non linéaires a été réduit à environ un dixième de celui de l'implémentation standard pour la même taille d'image.

Machine Translated by Google

Cela a réduit les temps de génération de build et de preuve. Cependant, la taille d'image maximale gérable n'atteignait toujours que 120 × 120 pixels, ce qui est considérablement petit pour des applications pratiques.

8. Discussion

Bien que des technologies cryptographiques compatibles ZK aient été utilisées et que les processus en circuit aient été optimisés lors de la mise en œuvre optimisée par ZK, la taille d'image maximale gérable était d'environ 120 × 120 pixels. Cela limite l'utilité pratique à des tailles d'image considérablement petites. Cependant, des recherches visant à améliorer les performances des ZKP sont en cours et les futurs progrès technologiques pourraient permettre de gérer des images de plus grande taille.

Par exemple, Zhang et al. [27] ont obtenu une accélération décuplée des zk-SNARK en utilisant les ASIC. Ma et coll. [16] ont également utilisé des unités de traitement graphique pour accélérer le temps de génération des preuves, atteignant des performances jusqu'à 48,1 fois plus rapides par rapport aux méthodes traditionnelles.

De plus, des méthodes pour simplifier les processus de calcul ont été proposées, comme la méthode du « pliage ». Cette méthode compresse les propositions à prouver [28]. À mesure que les améliorations de vitesse sont progressivement étudiées, la consommation de mémoire sera également probablement optimisée. Cela permettra potentiellement de gérer des tailles d'image plus grandes à l'avenir.

De plus, nous avons constaté que notre méthode de proposition peut gérer des tailles de données d'environ 10 Ko. Bien qu'il soit difficile d'appliquer directement notre proposition à des données d'images réalistes (allant de plusieurs Mo à des dizaines de Mo), diviser les données en morceaux en modifiant le cryptage et les chaînes intégrées pourrait rendre l'application réalisable.

De plus, nos implémentations nécessitent une valeur basée sur la taille des données originales à traiter (chiffrées) comme argument lors de la génération du circuit. Par conséquent, un circuit doit être généré pour chaque donnée. Le temps de génération du circuit (temps de construction) augmente considérablement avec la taille des données d'image ; par exemple, même dans une implémentation optimisée pour ZK, la génération d'un circuit pour une taille d'image de 120 × 120 nécessite plus de 112 minutes (6 7 Cependant, une fois le circuit généré, le temps de génération de la preuve dans les mêmes conditions est court, environ 97 s (96 580 ms). En d'autres termes, une fois qu'un circuit est généré, la génération de preuves ne prend pas beaucoup de temps. Ce fait ne pose aucun problème pratique dans les cas où la même image est distribuée à plusieurs personnes.

Dans les implémentations compatibles ZK, les données cryptées sont entrées en tant qu'entrée publique. La gestion des clés de chiffrement des images nécessite une attention particulière. Les données gérées dans IPFS privés sont cryptées. Cependant, si les clés de chiffrement sont divulguées, les données chiffrées pourraient être déchiffrées. Par conséquent, des utilisateurs spécifiques gérant des IPFS privés devraient devenir administrateurs pour gérer soigneusement les clés, ou une blockchain de type consortium pourrait être établie sur le même réseau pour définir et gérer les droits d'accès de manière appropriée.

9. Conclusions

Une nouvelle méthode a été proposée ici pour distribuer les données stockées dans un IPFS privé à des entités externes tout en rendant leur authenticité vérifiable. La méthode a appliqué un type de ZKP, zk- SNARKs, pour vérifier le CID des données et intégrer le nom du destinataire. Cette approche permet à des entités externes de vérifier que les données reçues sont générées à partir des données originales dans un IPFS privé sans nécessiter de détails tels que les droits d'accès IPFS et les clés de chiffrement.

Une implémentation standard utilisant des techniques cryptographiques conventionnelles et une implémentation optimisée pour ZK utilisant des schémas cryptographiques compatibles avec ZK ont été mises en œuvre pour améliorer l'efficacité informatique de la méthode proposée. Des expériences avec un exemple de programme ont confirmé l'efficacité de la méthode proposée pour une taille de données d'image allant jusqu'à 120 × 120 pixels.

Cette méthode proposée étend la gamme utilisable de systèmes de stockage décentralisés à un cas hybride, en distribuant les données internes à des entités externes spécifiques si nécessaire. Cette étude ouvre une nouvelle voie pour partager des informations sensibles entre différents secteurs au sein et à l'extérieur d'un groupe. Cependant, pour que la méthode proposée soit largement applicable à des types de données plus volumineux et plus diversifiés, tels que les images et les vidéos, la vitesse de traitement doit

Machine Translated by Google

être amélioré et des méthodes de fractionnement des données doivent être utilisées, ce qui entre dans le cadre de nos futures études.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, KS, CH, TTC et WO ; rédaction – préparation d'une ébauche originale , KS ; rédaction – révision et édition, KS et KI ; supervision, directeur général; administration du projet, KS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet de recherche collaboratif entre l'Université de Tokyo et Callisto Inc., financé par Callisto Inc. Ce travail a été soutenu par la Chaire dotée pour l'innovation Blockchain et le Centre Mohammed bin Salman pour les sciences et technologies futures d' Arabie Saoudite. -Japan Vision 2030 (MbSC2030) à l'Université de Tokyo.

Déclaration de disponibilité des données : le code source utilisé pour les simulations est disponible sur GitHub. https://github.com/blockchaininnovation/cicom_image_processing (consulté le 21 mars 2024).

Conflits d'intérêts : les auteurs Changhee Han, Tsz Tat Chu et Wataru Ozaki étaient employés par la société Callisto Inc. Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel. .

Les références

1. Groth, J. Sur la taille des arguments non interactifs basés sur l'appariement. Dans Proceedings of the Advances in Cryptology–EUROCRYPT 2016 : 35e Conférence internationale annuelle sur la théorie et les applications des techniques cryptographiques, Vienne, Autriche, 8-12 mai 2016 ; Actes, partie II 35 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016 ; pp. 305-326.
2. Kumar, S. ; Bharti, AK ; Amin, R. Stockage sécurisé décentralisé des dossiers médicaux à l'aide de Blockchain et IPFS : une comparaison analyse avec des orientations futures. Sécurisé. Priv. 2021, 4, e162. [Référence croisée]
3. Azbeg, K. ; Ouchetto, O. ; Andaloussi, SJ BlockMedCare : Un système de santé basé sur l'IoT, la Blockchain et l'IPFS pour les données sécurité de la gestion. Egypte. Informer. J. 2022, 23, 329-343. [Référence croisée]
4. Hossan, MS ; Khatun, ML; Rahman, S. ; Reno, S. ; Ahmed, M. Sécurisation du service de covoiturage à l'aide d'IPFS et d'hyperledger basé sur une blockchain privée. Dans les actes de la 24e Conférence internationale sur l'informatique et les technologies de l'information (ICCIT) 2021, Dhaka, Bangladesh, 18-20 décembre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 6.
5. Lin, Y. ; Zhang, C. Une méthode de protection des données privées dans IPFS. Dans les actes de la 24e conférence internationale de l'IEEE 2021 sur le travail coopératif en conception assisté par ordinateur (CSCWD), Dalian, Chine, 5-7 mai 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; pp. 404-409.
6. Battah, AA; Madine, MM; Alzaabi, H. ; Yaqoob, moi.; Salah, K. ; Jayaraman, R. Autorisation multipartite basée sur la blockchain pour accéder aux données cryptées IPFS. Accès IEEE 2020, 8, 196813-196825. [Référence croisée]
7. Huang, HS; Chang, TS; Wu, JY Un système de partage de fichiers sécurisé basé sur IPFS et blockchain. Dans les actes de la 2e Conférence internationale sur les communications électroniques, Singapour, 8-10 juillet 2020 ; pp. 96-100.
8. Soleil, J. ; Yao, X. ; Wang, S. ; Wu, Y. Système de stockage et d'accès sécurisé basé sur la blockchain pour les dossiers médicaux électroniques dans IPFS. Accès IEEE 2020, 8, 59389-59401. [Référence croisée]
9. Kang, P. ; Yang, W. ; Zheng, J. Méthode de partage de stockage de fichiers privés Blockchain basée sur IPFS. Capteurs 2022, 22, 5100. [CrossRef] [Pub Med]
10. Uddin, Minnesota ; Hasnat, AHMA; Nasrin, S. ; Alam, MS ; Yousuf, MA Système de partage de fichiers sécurisé utilisant les technologies blockchain, ipfs et pki. Dans les actes de la 5e Conférence internationale 2021 sur les technologies électriques de l'information et de la communication (EICT), Khulna, Bangladesh, 17-19 décembre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 5.
11. Li, W. ; Guo, H. ; Néjad, M. ; Shen, CC Gestion du trafic préservant la confidentialité : une approche inspirée de la blockchain et de la preuve de connaissance nulle. Accès IEEE 2020, 8, 181733-181743. [Référence croisée]
12. Bellés-Muñoz, M. ; Isabelle, M. ; Muñoz-Tapia, JL; Rubio, A. ; Baylina, J. Circom : Un langage de description de circuit pour la construction applications sans connaissance. IEEETrans. Sécurité fiable. Calculer. 2022, 20, 4733-4751. [Référence croisée]
13. Site officiel de Circom. Disponible en ligne : https://iden3.io/cicom (consulté le 24 mars 2024).
14. Dépôt Snarkjs Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/snarkjs (consulté le 4 juin 2024).
15. ZCash. Disponible en ligne : https://z.cash/ (consulté le 12 juillet 2024).
16. Ma, W. ; Xiong, Q. ; Shi, X. ; Maman, X. ; Jin, H. ; Kuang, H. ; Gao, M. ; Zhang, Y. ; Shen, H. ; Hu, W. Gzkp : Un système de preuve zéro connaissance accéléré par GPU. Dans Actes de la 28e Conférence internationale ACM sur le support architectural pour les langages de programmation et les systèmes d'exploitation, volume 2, Vancouver BC Canada, 25-29 mars 2023 ; pp. 340-353.
17. Han, C. ; Shibano, K. ; Ozaki, W. ; Osaki, K. ; Haraguchi, T. ; Hirahara, D. ; Kimura, S. ; Kobayashi, Y. ; Mogi, G. Plateforme tout-en-un pour la R&D en IA en imagerie médicale, englobant la collecte, la sélection, l'annotation et le prétraitement des données. Dans Actes de l' imagerie médicale 2024 : imagerie informatique pour les soins de santé, la recherche et les applications, San Diego, Californie, États-Unis, 18-23 février 2024 ; SPIE : Bellingham, WA, États-Unis, 2024 ; Volume 12931, pages 311 à 315.
18. Miano, J. Formats de fichiers d'images compressés : Jpeg, png, gif, xbm, bmp ; Addison-Wesley Professionnel : Boston, MA, États-Unis, 1999.

Machine Translated by Google

19. Identifiants de contenu (CID). Disponible en ligne : https://docs.ipfs.tech/concepts/content-addressing/#cids-are-not-file-hashes (consulté le 24 mars 2024). 20. Circom-chacha20 Dépôt Github. Disponible en ligne : https://github.com/reclaimprotocol/cicom-chacha20 (consulté le 24 mars 2024).
21. La police japonaise 8 × 8 points « Misaki Font ». Disponible en ligne : https://littlelimit.net/misaki.htm (consulté le 11 juin 2024). (En japonais)
22. Grassi, L. ; Khovratovitch, D. ; Rechberger, C. ; Roy, A. ; Schofnegger, M. Poseidon : Une nouvelle fonction de hachage pour les systèmes de preuve {Zero-Knowledge} . Dans Actes du 30e USENIX Security Symposium (USENIX Security 21), Vancouver, BC, Canada, 11-13 août 2021 ; pp. 519-535.
23. Dépôt Circomlib Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/cicomlib (consulté le 21 mars 2024).
24. Dépôt Circomlibjs Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/cicomlibjs (consulté le 21 mars 2024).
25. Khovratovich, D. Cryptage avec Poséidon. 2019. Disponible en ligne : https://drive.google.com/file/d/1EVrP3DzoGbmzkRmYnyEDcIQcXVU7GlOd/view (consulté le 19 juillet 2024).
26. Dépôt Github Poséidon-Encryption-Circom2. Disponible en ligne : https://github.com/Shigoto-dev19/poseidon-encryption-c ircom2 (consulté le 21 mars 2024).
27. Zhang, Y. ; Wang, S. ; Zhang, X. ; Dong, J. ; Mao, X. ; Longue, F. ; Wang, C. ; Zhou, D. ; Gao, M. ; Sun, G. Pipezk : Accélérer la preuve sans connaissance avec une architecture pipeline. Dans les actes du 48e Symposium international annuel ACM/IEEE 2021 sur l'architecture informatique (ISCA), Valence, Espagne, du 14 au 18 juin 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; pp. 416-428.
28. Kothapalli, A. ; Setty, S. ; Tzialla, I. Nova : Arguments récursifs à connaissance nulle issus de schémas de repliement. Dans Actes de la conférence annuelle internationale sur la cryptologie, Santa Barbara, Californie, États-Unis, 15-18 août 2022 ; Springer : Cham, Suisse, 2022 ; pp. 359-388.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Enquêter et atténuer le compromis performance-équité via l'échantillonnage de catégories protégées

Gédéon Popoola et John Sheppard *

Gianforte School of Computing, Montana State University, Bozeman, MT 59717, États-Unis ;
gideon.popoola@student.montana.edu *
Correspondance : john.sheppard@montana.edu

Résumé : Les algorithmes d'apprentissage automatique sont devenus courants dans la prise de décision quotidienne, et les systèmes d'aide à la décision sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Par conséquent, les recherches sur la prévention et l'atténuation des biais potentiels et de l'injustice des prédictions faites par ces algorithmes se sont multipliées ces dernières années. La plupart des recherches sur l'équité et l'atténuation des biais dans l'apprentissage automatique traitent souvent chaque variable protégée séparément, mais en réalité, il est possible qu'une personne appartienne à plusieurs catégories protégées. Par conséquent, dans ce travail, la combinaison d'un ensemble de variables protégées et la génération de nouvelles colonnes séparant ces variables protégées en de nombreuses sous-catégories ont été examinées.
Ces nouvelles sous-catégories ont tendance à être extrêmement déséquilibrées, c'est pourquoi l'atténuation des biais a été abordée comme un problème de classification déséquilibrée. Plus précisément, quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage personnalisées ont été développées et étudiées pour échantillonner ces nouvelles sous-catégories. Ces nouvelles méthodes d'échantillonnage sont appelées suréchantillonnage de catégorie protégée, échantillonnage proportionnel de catégorie protégée, technique de suréchantillonnage synthétique minoritaire de catégorie protégée (PC-SMOTE) et échantillonnage synthétique adaptatif de catégorie protégée (PC-ADASYN). Ces méthodes d'échantillonnage modifient la méthode d'échantillonnage existante en concentrant leur échantillonnage sur les nouvelles sous-catégories plutôt que sur l'étiquette de classe. L'impact de ces stratégies d'échantillonnage a ensuite été évalué sur la base des performances classiques et de l'équité dans les contextes de classifica
Les performances de classification ont été mesurées à l'aide de l'exactitude et de F1 sur la base d'arbres de décision univariés d'entraînement, et l'équité a été mesurée à l'aide de différences impaires égalisées et de parité statistique. Pour évaluer l'impact de l'équité par rapport à la performance, ces mesures ont été évaluées par rapport à la profondeur de l'arbre de décision. Les résultats montrent que les méthodes proposées ont pu déterminer les points optimaux, grâce auxquels l'équité a été augmentée sans diminuer les performances, atténuant ainsi tout compromis potentiel entre performances et équité.

Mots-clés : équité ; catégories protégées; apprentissage automatique ; échantillonnage

check for updates

Citation : Popoola, G. ; Sheppard, J. Enquêter et atténuer les Compromis performance-équité via Échantillonnage de catégorie protégée. Électronique 2024, 13, 3024. https://doi.org/10.3390/electronics13153024

Rédacteurs académiques : Niusha Shafiabady et Jianlong Zhou

Reçu : 11 juin 2024
Révisé : 23 juillet 2024
Accepté : 24 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Alors que les algorithmes d'apprentissage automatique (ML) dominent de plus en plus les systèmes de prise de décision et d'aide à la décision, leur déploiement généralisé dans divers secteurs soulève des questions urgentes quant à l'équité et à la transparence de leurs prédictions [1]. Le potentiel de ces algorithmes à perpétuer ou à exacerber les préjugés sociétaux existants a donné naissance à un nombre important de recherches visant à enquêter et à atténuer l'injustice algorithmique. Ceci est essentiel car les décisions influencées par ces algorithmes ont un impact profond sur les individus, affectant les résultats dans des domaines allant de la finance et de l'emploi à la justice pénale et aux soins de santé [2].

La source d'injustice et de biais dans le ML a de multiples facettes [3]. En particulier, il est possible que l'injustice provienne directement des algorithmes de ML eux-mêmes en raison d'un éventuel désalignement du biais inductif sous-jacent des algorithmes par rapport au concept cible et à la distribution des données. C'est ce qu'on appelle le biais algorithmique. Une autre préoccupation réside dans le biais potentiel résidant dans les données utilisées pour former les modèles où, en conséquence directe de l' hypothèse typique « indépendante et distribuée à l'identique » (IID) utilisée dans la plu

Machine Translated by Google

méthodes, le résultat de l'apprentissage est de propager le biais dans les prédictions de telle sorte qu'ils correspondent au biais dans les données sous-jacentes elles-mêmes. C'est cette dernière situation qui constitue ici le centre de notre travail.

1.1. Biais et injustice dans l'apprentissage automatique

Le biais est le traitement préjudiciable, injuste ou inégal d'un individu ou d'un groupe sur la base de caractéristiques spécifiques, souvent appelées caractéristiques sensibles ou protégées [4]. Des exemples de ces caractéristiques protégées incluent l'âge, la race, le handicap, le sexe et le genre [5]. Les biais dans le ML peuvent être grossièrement divisés en traitement disparate (injustice directe) et traitement d'impact (injustice indirecte) [6]. Une injustice directe se produit lorsque des éléments protégés sont utilisés explicitement dans la prise de décisions. L'injustice indirecte est devenue de plus en plus courante aujourd'hui. Ce type d'injustice n'utilise pas explicitement les attributs protégés ; au lieu de cela, cela se produit lorsque le recours à des variables associées à ces attributs aboutit à des résultats significativement différents pour les groupes protégés. Ces autres variables sont appelées fonctionnalités proxy. Des exemples de préjugés concrets incluent la pratique historique américaine de « redlining », où les prêts hypothécaires immobiliers ont été refusés aux résidents de codes postaux majoritairement habités par des minorités, les préjugés sexistes dans le processus d'embauche d'Amazon, les préjugés raciaux des distributeurs de savon de Google, etc. [7].

Bien que ces outils d'aide à la décision aident à automatiser le processus de prise de décision, ces outils peuvent entraîner un traitement injuste des individus ou des groupes, directement ou indirectement [8]. Une injustice peut survenir dans plusieurs domaines de la modélisation, comme dans l' ensemble de données d'entraînement. Cela peut se produire lorsque l'ensemble de données de formation ne fournit pas une représentation équitable des catégories protégées, de sorte que la « vérité terrain » devient difficile à déterminer. Par exemple, considérons un ensemble de données provenant d'une entreprise dans laquelle un groupe spécifique a toujours été victime de discrimination. Supposons plus précisément que les employées féminines de cette entreprise n'aient pas été promues au même titre que leurs homologues masculins, qui, en revanche, ont connu une évolution de carrière, même si les deux groupes ont atteint le même niveau. Dans cette situation, la véritable valeur des contributions des salariées féminines – la vérité terrain – n'est pas visible. En conséquence, un algorithme de ML entraîné sur ces données est susceptible de détecter et d'intégrer ce biais, perpétuant ainsi les préjugés existants. Cela pourrait amener l'algorithme à prendre des décisions discriminatoires, par exemple en recommandant des candidats masculins à l'embauche ou à une promotion plus fréquemment que des candidates féminines tout aussi qualifiées ou plus qualifiées.

Un autre domaine dans lequel une injustice peut survenir est celui de l'algorithme ML lui-même [9]. Les algorithmes de ML peuvent toujours produire des décisions discriminatoires, même lorsqu'ils sont formés sur un ensemble de données impartial où la « vérité terrain » est représentée avec précision. Cette situation se produit lorsque les erreurs du système affectent de manière disproportionnée les individus d'un groupe ou d'une minorité spécifique. Par exemple, considérons un algorithme de détection du cancer du sein qui présente des taux de faux négatifs significativement plus élevés pour les individus noirs que pour les individus blancs, ce qui signifie qu'il ne parvient pas à identifier le cancer du sein plus fréquemment chez les patientes noires que chez les patientes blanches. Si cet algorithme est utilisé pour éclairer les recommandations de traitement, il déconseillerait à tort le traitement à un plus grand nombre d'individus noirs que de blancs, ce qui entraînerait des disparités raciales dans les résultats des soins de santé. Cela souligne la nécessité cruciale de garantir que les algorithmes fonctionnent de manière équitable dans tous les groupes en termes de données d'entraînement et de la manière dont leurs erreurs affectent différentes populations. Les résultats de la littérature antérieure ont rapporté plusieurs cas d'algorithmes entraînant un traitement injuste, par exemple, redlining et profilage racial [10], discrimination hypothécaire [11], emploi et sélection du personnel [12].

Alors que des efforts considérables ont été consacrés à la lutte contre les biais dans les prédictions de ML [13, 14], une grande partie des recherches existantes se sont concentrées sur l'atténuation des biais pour des attributs protégés uniques de manière isolée [15]. Par exemple, sur un ensemble de données avec deux attributs protégés, la race et le sexe, la plupart des approches existantes peuvent apprendre soit un modèle équitable impliquant la race, soit un modèle équitable impliquant le sexe mais pas un modèle équitable impliquant à la fois la race et le sexe [7]. Cependant, les identités du monde réel ne sont pas singulières ; ils sont complexes et multiformes, les individus appartenant souvent simultanément à plusieurs groupes protégés [16]. Par exemple, une personne peut être victime simultanément de discrimination sur la base de plusieurs attributs protégés tels que l'âge, la race et le sexe. Cette intersectionnalité peut conduire à des formes aggravées de biais et

Machine Translated by Google

discrimination, qui ne sont pas traitées de manière adéquate par des interventions d'équité à variable unique. Il est donc essentiel de développer des méthodologies qui abordent de manière holistique la nature multidimensionnelle des identités personnelles. Ce projet cherche à combler cette lacune en considérant des combinaisons de catégories protégées, synthétisant ainsi ces catégories protégées en groupes multicatégories complets, et vise à aborder plus efficacement les complexités des biais en utilisant de nouvelles méthodes d'échantillonnage de catégories protégées, reconnaissant et abordant ainsi la nature multiforme. des identités personnelles et des préjugés potentiels.

Les travaux présentés dans cet article sont motivés par le problème de l'utilisation d'algorithmes de ML pour la prise de décision dans des domaines socialement sensibles tels que l'évaluation des prêts, l'embauche ou l'évaluation des prêts hypothécaires, en travaillant avec cette situation où un individu peut appartenir à plusieurs catégories protégées. Étant donné un ensemble de données d'entraînement étiqueté contenant deux ou plusieurs caractéristiques protégées, la méthode proposée combine ces attributs protégés puis les divise en nouvelles multicatégories. Ces nouvelles catégories sont susceptibles d'être extrêmement déséquilibrées et doivent être équilibrées pour améliorer l'équité de la prédiction de nos algorithmes ML. Les méthodes d'échantillonnage populaires telles que le suréchantillonnage [17], la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques (SMOTE) [18], l'échantillonnage synthétique adaptatif (ADASYN) [19], etc., échantillonnent les données sur plusieurs étiquettes de classe, ce qui ne correspond pas à l'objectif de notre recherche d'échantillonnage à travers les nouvelles multicatégories. Par conséquent, une nouvelle classe de modifications de ces méthodes d'échantillonnage est proposée, capable d'échantillonner à travers la nouvelle catégorie plutôt que les étiquettes de classe. Cette nouvelle classe d' échantillonnage modifié est appelée échantillonnage de catégorie protégée. Les méthodes d'échantillonnage des catégories protégées proposées qui en résultent sont utilisées pour échantillonner et équilibrer les nouvelles catégories avant d'effectuer la classification. La nouveauté de ce travail est double. Premièrement, l'approche proposée combine les catégories protégées pour former de nouvelles multicatégories qui imitent l'identité de l'être humain dans le monde réel. La seconde est la modification des méthodes d'échantillonnage existantes pour se conformer à l'échantillonnage de ces nouvelles catégories afin de s'assurer que toutes les nouvelles catégories ont le même nombre d

À des fins de démonstration uniquement, un arbre de décision univarié a été choisi comme algorithme de classification. L'objectif est de démontrer les effets des différentes méthodes d'échantillonnage sur les performances, en espérant que des tendances similaires se manifesteront quelle que soit la méthode d'apprentissage sous-jacente. La méthode d'échantillonnage proposée a été comparée à la référence (données non échantillonnées) en utilisant l'exactitude et F1 comme mesures de performance de classification, ainsi que les différences de cotes égalisées et la parité statistique comme mesures d'équité. En outre, plusieurs analyses ont été effectuées pour montrer comment la profondeur maximale de l'arbre de décision affecte à la fois l'exactitude et l'équité.

1.2. Question de

recherche Partant de l'observation empirique selon laquelle un compromis existe parfois entre l'équité et les performances du ML [20], cette recherche tente de répondre à plusieurs questions, telles que la manière dont ce compromis pourrait être atténué. En particulier, nous cherchons à déterminer si la méthode d'échantillonnage des catégories protégées pour lutter contre l'équité peut atténuer ce compromis. De plus, pouvons-nous développer un cadre méthodologique qui atténue efficacement les biais entre ces variables protégées combinées sans compromettre la précision prédictive des modèles ML ? Enfin, nous prévoyons de répondre à la question de savoir comment la profondeur d'un arbre de décision affecte à la fois les mesures d'exactitude et d'équité, explorant ainsi la relation entre le niveau d'ajustement (du sous-apprentissage au surapprentissage) et l'équité.

1.3. Hypothèse

Nous émettons l'hypothèse qu'en employant des techniques sophistiquées d'échantillonnage de catégories protégées conçues pour ces groupes multicatégories nouvellement formulés, nous pouvons augmenter considérablement l'équité du modèle en termes de différences de cotes égalisées sans diminuer les performances de classification en termes de précision et de F1. En outre, nous explorons l'équilibre délicat entre équité et exactitude, en émettant l'hypothèse qu'il est possible d'identifier les points stratégiques où l'équité peut être maximisée sans impact négatif sur la performance.

Cette recherche remet en question les affirmations existantes selon lesquelles il existe des compromis en matière d'équité et de ML.

Machine Translated by Google

prédiction. Il ouvre la voie à de futures explorations de la nature multidimensionnelle de l'identité et de la discrimination dans les systèmes de décision automatisés.

1.4. Contributions

Le vaste problème de l'équité dans l'apprentissage automatique est important dans la mesure où la prévalence des systèmes d'IA et de ML a aujourd'hui un impact majeur sur la vie et les moyens de subsistance des gens. Bien que l'attention portée au ML équitable ait considérablement augmenté, il reste nécessaire de trouver des méthodes permettant de faire progresser le ML équitable sans avoir d'impact négatif sur les performances du ML. Basées sur une revue approfondie de la littérature et sur la nécessité de ce type de travail, les méthodes rapportées ici apportent les contributions suivantes : 1.

L'hypothèse communément admise selon laquelle il existe un compromis inhérent entre l'équité et la performance (c'est-à-dire l'exactitude) dans l'apprentissage automatique est remis en question par les preuves fournies pour soutenir ce défi. En particulier, les résultats présentés dans cet article indiquent qu'un tel compromis peut être atténué, ce qui suggère que tout compromis est très probablement lié à la manière dont les données sont gérées.

2. Quatre nouvelles méthodes de prétraitement pour l'échantillonnage des données sont présentées, basées sur l'application d'une stratégie d'échantillonnage multicatégorie utilisant des données capturées dans des catégories protégées. Les méthodes partent de l'hypothèse et de l'hypothèse correspondante selon lesquelles l'équilibrage des données sur la base de ces propriétés multicatégories peut accroître l'équité sans affecter négativement les performances du modèle d'apprentissage automatique.
3. Les résultats expérimentaux sont présentés à l'aide de trois ensembles de données étudiés de manière approfondie au sein de la communauté Fair ML. Les expériences incluent des comparaisons avec des méthodes traditionnelles de formation sans rééchantillonnage pour démontrer les effets relatifs des méthodes proposées. Les résultats démontrent que deux des méthodes proposées, la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques de catégorie protégée (PC-SMOTE) et l'échantillonnage synthétique adaptatif de catégorie protégée (PC-ADASYN), sont particulièrement efficaces pour améliorer à la fois l'équité et les performances.
4. Une analyse détaillée relative aux effets potentiels du sous-ajustement et du surajustement sur l'équité est présentée en examinant différents niveaux dans un modèle d'arbre de décision, avec et sans utilisation des méthodes d'échantillonnage proposées. Les résultats démontrent la capacité des méthodes proposées à identifier un niveau idéal de l'arbre où l'équité et la précision sont maximisées.

Grâce aux contributions ci-dessus, ce travail représente une avancée significative dans la résolution des problèmes d'équité dans l'apprentissage automatique. L'un des principaux enseignements des méthodes et des résultats présentés ici est que l'équité peut être assurée sans compromettre les performances du modèle.

1.5. Organisation

Cet article est organisé comme suit. Dans la section 2, une explication détaillée de l'équité et une discussion de plusieurs mesures techniques d'équité sont présentées. Ensuite, dans la section 3, la littérature antérieure relative aux stratégies d'atténuation des biais est décrite. Dans la section 4, nous décrivons nos techniques d'échantillonnage proposées, notre ensemble de données et notre approche du réglage des hyperparamètres. Dans la section 5, nous présentons les résultats de plusieurs expériences ainsi que des tests d'hypothèses statistiques comme moyen de valider ces résultats. Dans la section 6, les résultats expérimentaux sont discutés et les performances de chaque algorithme sur chaque ensemble de données et chaque métrique sont analysées. D'autres résultats sur l'impact de la profondeur des arbres sur l'équité et la précision sont également présentés. Dans la section 7, les limites de ce travail et les orientations correspondantes pour les travaux futurs sont présentées, et la section 8 présente un certain nombre de conclusions.

2. Contexte Cette

étude considère l'équité lors de la prédiction d'un résultat $y \in Y$ à partir d'un ensemble de paramètres tels $\text{tures } x \in X \subseteq \mathbb{R}^d$ et quelques attributs protégés supplémentaires $s \in S \subseteq \mathbb{R}^p$ genre et sexe. , que la race, Par exemple, dans la prévision d'un prêt, x représente les antécédents financiers d'un demandeur, s est sa race et son sexe déclarés, et y indique si son prêt est approuvé.

Machine Translated by Google

ou refusé. Un modèle de prédiction est considéré comme équitable si ses erreurs sont réparties uniformément entre les groupes protégés comme les différentes races ou sexes. Les prédictions de classe à partir des données d'entraînement D sont notées Yˆ D := h(x, s) pour certains h : X × S → Y d'une classe H. Les attributs protégés s S dans notre étude sont supposés être binaires avec un paramètre spécial valeur n désignant le groupe non privilégié. Par exemple, S pourrait être la race et n « non-Blanc » ; par conséquent, la nature binaire de S est {w, n} où w représente les candidats blancs, qui constituent le groupe privilégié, et n représente les candidats non blancs, qui constituent le groupe non privilégié. La définition peut être généralisée aux cas non binaires.

X , La discrimination dans les ensembles de données étiquetés peut être définie comme étant donné un ensemble de données D, un ensemble de fonctionnalités et un ensemble d'attributs protégés S avec une valeur de domaine {w, n}. La discrimination en D par rapport au groupe S = n noté diss=n(D) est définie comme

$$\text{diss=n(D)} = \left|\frac{|\{x \quad D : x(s) = w, h(x) = +\}|}{\{x \quad D : x(s) = w\}|} - \frac{|\{x \quad D : x(s) = n, h(x) = +\}| \; |\{x}{D : x(s) = n\}|}\right.$$

La définition ci-dessus peut être traduite par la différence de probabilité qu'un candidat soit dans la classe positive pour chaque domaine d'attributs protégés {w, n}. Notre étude étend la définition ci-dessus en considérant l'ensemble de données D, qui contient deux ou plusieurs attributs protégés.

Deux mesures d'équité populaires sont utilisées. Le premier est la différence impaire égalisée (EOD), qui mesure le degré de discrimination ou d'équité de notre prédiction. EOD déclare qu'un classificateur binaire yˆ est juste si son taux de faux négatifs (FNR) et son taux de vrais positifs (TPR) sont égaux dans le domaine de S [21]. FPR et TPR par rapport à l'attribut protégé s S de valeur n peuvent être définis comme

$$TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n)$$

L'EOD est ensuite défini mathématiquement comme la différence entre TPR et FPR entre différents groupes dans un attribut protégé. C'est,

$$EOD = TPRn(\hat{y}) - FPRn(\hat{y}).$$

Un classificateur équitable a un EOD de 0, tandis qu'un classificateur injuste a un EOD de 1. Bien qu'il soit presque impossible d'obtenir un classificateur totalement équitable en pratique, cette recherche vise à améliorer l'EOD sans diminuer la précision. Ensuite, pour l'EOD,

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n) = TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

et

$$FPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w) = TPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w)$$

Pour étendre la définition EOD ci-dessus à notre multicatégorie, l'EOD est calculé pour chaque colonne, puis la macromoyenne de l'EOD est présentée comme l'EOD finale. La deuxième métrique utilisée pour mesurer l'équité dans la prédiction ML est la parité statistique (SP). SP définit l'équité comme une probabilité égale d'être classé comme positif [22]. Cela peut être interprété comme chaque groupe d'un attribut protégé ayant la même probabilité d'être classé avec un résultat positif.

$$P(\hat{y} = 1|S = w) = P(\hat{y} = 1|S = n)$$

3. Revue de la littérature

Les algorithmes de ML, de plus en plus utilisés pour la prise de décision dans des applications critiques telles que la récidive, la notation de crédit, les décisions de prêt, etc., pourraient initialement être considérés comme équitables et exempts de biais inhérents. Cependant, en réalité, ils peuvent hériter de tout biais ou discrimination présent dans les données sur lesquelles ils sont formés, comme le note Burt [23]. De plus, la simple suppression des variables protégées de l'ensemble de données ne suffit pas pour lutter contre la discrimination indir

Machine Translated by Google

pourrait, en fait, le cacher. Cette reconnaissance a accru le besoin d' outils plus avancés, faisant de la découverte et de la prévention de la discrimination un domaine de recherche important, comme le soulignent [24-27].

Les biais dans le ML sont un sujet en pleine croissance dans la communauté de recherche sur l'apprentissage automatique. Les biais d'un modèle ML peuvent conduire à un traitement injuste des personnes appartenant à certains groupes protégés. Dernièrement, les leaders industriels ont commencé à mettre de plus en plus l'accent sur les biais dans les modèles et logiciels de ML. L'Institute for Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [28], Microsoft [29] et l'Union européenne [30] ont récemment publié des principes pour guider une conduite équitable en matière d'IA. Ces organisations ont déclaré que les modèles ML doivent être équitables dans les applications du monde réel . Les stratégies d'atténuation des biais impliquent de modifier un ou plusieurs des éléments suivants pour garantir que les prédictions faites par l'algorithme ML sont moins biaisées : (a) les données d'entraînement, (b) l'algorithme ML et (c) les prédictions qui en résultent elles-mêmes. Celles-ci sont respectivement classées en approches de prétraitement [31], d'inprocessing [32] et de post-traitement [21].

Premièrement, les données de formation peuvent être prétraitées pour réduire les injustices ou les biais avant de former le modèle. Kamiran et Calders [6] suggèrent d'échantillonner ou de repondérer les données pour neutraliser la discrimination. Cette approche peut ajuster la représentation ou l'importance de certains points de données pour favoriser (ou réduire la faveur) une classe par rapport à une autre. Une autre méthode consiste à modifier directement les enregistrements de données individuelles pour réduire la discrimination, comme l'explorent [33]. Par exemple, cette approche consiste à modifier les valeurs d'un ensemble de données pour réduire les préjugés identifiables à l'encontre de certains groupes. De plus, le concept de proximité t, introduit par Sondeck et al. [34], est appliqué au contrôle de discrimination dans les travaux de [35]. L'utilisation de la proximité t garantit que la distribution des attributs sensibles dans un groupe donné est proche de la distribution de l' attribut dans l'ensemble de données, préservant ainsi la confidentialité et empêchant la discrimination basée sur des attributs sensibles. Un fil conducteur entre ces approches consiste à équilibrer le contrôle de la discrimination avec l'utilité des données traitées, c'est-à-dire minimiser les biais sans compromettre de manière significative l'exactitude, la représentativité et l'utilité globale des données pour la modélisation ou l'analyse prédictive. Cet équilibre est essentiel pour garantir que les efforts visant à promouvoir l'équité ne réduisent pas par inadvertance la qualité ou l'applicabilité des données.

Dans l'ensemble, la méthode de prétraitement peut être divisée en trois catégories : (1) modification des données, (2) suppression des données et (3) rééchantillonnage des données. Les méthodes de la première catégorie visent à modifier les valeurs des points de données d'entraînement (y compris les valeurs d'attributs protégés, les valeurs de classe et les valeurs de caractéristiques) afin de réduire le biais dans l'ensemble de données. Un exemple de cette méthode est le massage de données proposé par [15]. Leur approche classe les données de formation et les données proches de la limite de décision dans les groupes privilégiés et non privilégiés sont inversées. Alternativement, une méthode de prétraitement optimisée qui apprend une transformation probabiliste qui modifie les classes et les caractéristiques avec une distorsion individuelle et une équité de groupe a été proposée par Fahse et al. [23]. Dans [36], les valeurs d'attribut d'origine sont remplacées par des valeurs choisies indépendamment de l'étiquette de classe pour former un modèle atteignant à peu près des chances égalisées. De même, Peng et al. [37] remplacent les valeurs d'attribut protégées par des valeurs prédites sur la base d'autres attributs, similaires à l'imputation de données.

Les méthodes de la deuxième catégorie visent à former un modèle équitable en supprimant certaines fonctionnalités de l'ensemble de formation. Un exemple de cette méthode est la suppression des données proposée par Dhar et al. [38]. Dans leur article, les attributs et caractéristiques protégés qui sont fortement corrélés aux attributs protégés, également appelés attributs proxy, sont supprimés de l' ensemble de données pour former un modèle équitable.

Les méthodes de la troisième catégorie visent à former un modèle équitable soit en ajustant les poids d'échantillonnage, soit en suréchantillonnant l'ensemble de données. Par exemple, Krasanakis et al. [39] ont proposé une méthode de repondération qui adapte de manière itérative les poids des échantillons d'entraînement avec un modèle théoriquement fondé pour atténuer le compromis biais-précision. Dans [40], Chakraborty et al. a proposé FairSMOTE comme méthode pour suréchantillonner les points de formation de groupes minoritaires avec des points de données artificiels basés sur la technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques (SMOTE) [18], afin d'obtenir des distributions de classes équilibrées. De plus, Yan et al. [41] ont proposé de suréchantillonner les données de formation des groupes minoritaires avec des points de données artificiels pour obtenir une répartition équilibrée des

Machine Translated by Google

tion. Contrairement à FairSMOTE, les auteurs se sont concentrés sur des scénarios dans lesquels les attributs protégés sont inconnus et ont appliqué une méthode de regroupement pour identifier différents groupes démographiques.

L'inprocessing implique des méthodes qui modifient la façon dont un modèle ML est formé afin de réduire les biais. Dans [42], une approche de débiaisation contradictoire a été proposée. Cette approche apprend un classificateur pour augmenter la précision et l'équité de la prédiction en incluant une variable pour le groupe intéressé en apprenant simultanément un prédicteur et un adversaire. Cela conduit à la génération d'un classificateur impartial car les prédictions ne contiennent aucune information de discrimination de groupe que l'adversaire pourrait utiliser. Alternativement, un algorithme qui prend une métrique d'équité dans le cadre de la fonction de perte et renvoie un modèle formé pour cette métrique d'équité a été proposé dans [43]. Kamishima et coll. [22] ont proposé une méthode de régularisation, qui incluait un terme de pénalité dans la fonction de perte d'un classificateur pour produire une prédiction impartiale. Zafar et coll. [44] ont développé une nouvelle méthode de pondération par laquelle ils ajustent le poids de l'échantillon pour chaque donnée de formation afin d'atteindre un objectif d'équité spécifique, tel que des cotes égalisées sur les données de validation. Récemment, l'atténuation des biais a été abordée comme un problème d'optimisation sous contrainte en ajoutant une contrainte d'équité et en optimisant la perte pour qu'elle soit cohérente avec cette contrainte [45,46]. De plus, certains travaux modifient les réseaux de neurones en utilisant le dropout pour supprimer les neurones appartenant à des attributs pr

Les méthodes de post-traitement atténuent les biais après l'ajustement d'un modèle ML et incluent des approches telles que le calibrage, l'optimisation des contraintes et le seuillage de transformation [6]. De telles méthodes proposent un algorithme qui donne des résultats favorables aux groupes non privilégiés et des résultats défavorables aux groupes favorables dans un intervalle de confiance donné autour de la limite de décision présentant la plus grande incertitude. Par exemple, une approche modifie les seuils maximaux du classificateur pour produire un objectif spécifié d'égalité des chances ou de cotes égalisées. Une autre approche consiste à muter aléatoirement les classes de certaines prédictions en différentes classes [48].

Plusieurs nouvelles études [49,50] ont combiné soit le prétraitement, soit le traitement interne, soit le post-traitement pour former une méthode d'ensemble. Par exemple, Bhaskaruni et al. [50] combinent le suréchantillonnage de la classe protégée contre le déséquilibre avec une frontière de décision déplaçant une méthode de post-traitement pour résoudre le problème d'injustice.

Les chercheurs se sont penchés sur divers concepts de discrimination et d'équité dans le cadre de la prise de décision algorithmique. L'impact disparate (appelé auparavant équité indirecte), par exemple, est mesuré par la parité statistique et l'équité de groupe, comme l'expliquent Bhaskaruni et al. [50]. D'un autre côté, le concept d'équité individuelle, également introduit par Bhaskaruni et al., souligne que des individus similaires doivent être traités de la même manière, quelle que soit leur appartenance à un groupe. Cette approche se concentre sur l'équité au niveau individuel , garantissant que les décisions sont prises sur la base d'attributs pertinents plutôt que de stéréotypes ou de préjugés de groupe .

Dans les classificateurs et autres modèles prédictifs, atteindre des taux d'erreur égaux entre différents groupes est un objectif clé, comme le soulignent Zhang et Neill [16]. De même, garantir le calage ou l'absence de biais prédictif dans les prédictions, comme discuté par Hardt et al. [21], est cruciale. Cependant, la tension entre ces notions – calibrage et taux d'erreur égaux – est explorée par Dwork et al. [51] et Pleiss et al. [52], indiquant que satisfaire simultanément les deux peut être un défi. Karimi-Haghighi et Castillo [53] présentent des travaux connexes explorant les complexités inhérentes à la réalisation de l'équité algorithmique. Friedler et coll. [54] examine en outre les compromis nécessaires pour répondre à diverses définitions algorithmiques de l'équité, en particulier du point de vue de la sécurité publique. Étant donné que nos travaux se concentrent sur le prétraitement plutôt que sur la modélisation, des considérations telles que les taux d'erreur équilibrés et le biais prédictif deviennent moins directement applicables.

Sur la base de notre examen de diverses méthodes de prétraitement, il semble qu'aucun travail n'ait été mené pour tenter de modéliser l'équité pour deux ou plusieurs attributs protégés simultanément. En outre, la méthode d'échantillonnage utilisée dans les travaux antérieurs se concentrait uniquement sur l'échantillonnage basé sur les étiquettes de classe plutôt que sur les catégories protégées. Par conséquent, dans cet article, l'accent est mis sur le prétraitement car il représente l'aspect le plus adaptable du pipeline de science des données [55]. Le prétraitement se distingue par le fait qu'il ne dépend pas du choix de l'algorithme de modélisation et peut être exécuté de manière transparente.

Machine Translated by Google

intégrés aux mécanismes de diffusion et de publication des données. Cette indépendance et cette flexibilité rendent le prétraitement essentiel pour garantir la qualité et l'équité des données avant toute modélisation analytique ou prédictive. Enfin, nous nous concentrons sur de nouvelles méthodes d'échantillonnage personnalisées qui échantillonnent la catégorie protégée dans la formation des données pour construire un modèle équitable.

4. Méthodologie

L'objectif de notre travail est d'explorer des méthodes d'échantillonnage pour améliorer l'équité dans le ML sans que les performances de prédiction correspondantes en souffrent, atténuant ainsi le compromis équité-performance . En conséquence, quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage axées sur la réalisation de cet objectif sont proposées. Ces méthodes d'échantillonnage résolvent le problème de classe déséquilibrée posé par la nouvelle multicatégorie générée en raison de la combinaison des catégories protégées. Des méthodes d'échantillonnage personnalisées sont nécessaires car les méthodes existantes échantillonnent les données en fonction des classes minoritaires et majoritaires, mais par souci d'équité, les nouvelles multicatégories sont échantillonnées de manière égale. Cela nécessite à son tour de modifier les méthodes d'échantillonnage existantes pour échantillonner les données en fonction de ces nouvelles catégories. Cela conduit à quatre nouvelles méthodes d'échantillonnage : le suréchantillonnage de catégorie protégée, l'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée, le SMOTE de catégorie protégée (PC- SMOTE) et l'ADASYN de catégorie protégée (PC-ADASYN).

4.1. Suréchantillonnage de catégories

protégées Dans le suréchantillonnage de catégories protégées, la première étape consiste à combiner les catégories protégées dans l'ensemble de données et à coder la combinaison pour produire notre nouvelle multicatégorie. Par exemple, dans l'ensemble de données sur le revenu des adultes, l'âge (jeunes et adultes), la race (blancs et autres) et le sexe (hommes et femmes) sont combinés pour générer huit nouvelles catégories, qui deviennent ADULTWHITEMALE, ADULTOTHERSMALE, YOUNGWHITEMALE, YOUNGOTHERSMAIL, ADULTWHITEFEMALE, ADULTOTHERSFEMALE, YOUNGWHITEFEMALE et YOUNGOTHERSFEMALE, respectivemer Ces nouvelles catégories ont des tailles d'échantillon variables, et l'objectif de notre suréchantillonnage de catégories protégées est d'équilibrer cette nouvelle catégorie de telle sorte que la taille de l'échantillon de chacune des nouvelles catégories corresponde à la taille de la catégorie avec la taille d'échantillon la plus élevée. Pour éviter les fuites de données, l'ensemble de données est séparé en train et test, en appliquant un suréchantillonnage uniquement sur les données de formation, puis en testant sur un ensemble de test non échantillonné.

Le pseudocode de l'algorithme 1 montre en détail notre méthode de suréchantillonnage de catégories protégées. Dans l'algorithme, la catégorie la plus grande a été utilisée comme référence car il s'agit de la catégorie avec la taille d'échantillon la plus élevée. Le processus d'échantillonnage aboutit à de nouvelles données de formation avec une taille d'échantillon équilibrée dans la nouvelle catégorie. L'algorithme fonctionne en échantillonnant le reste des catégories protégées pour correspondre à la taille de l'échantillon de la ligne de base. Cet échantillonnage est effectué en répétant les catégories plusieurs fois avec leurs étiquettes de classe.

4.2. Échantillonnage proportionnel de catégorie protégée

La méthode d'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée est une généralisation du suréchantillonnage de catégorie protégée car le processus commence par la définition d'une taille d'échantillon cible (qui est un hyperparamètre à régler, plutôt que simplement la taille de la plus grande multicatégorie), appelée targetSamples. Cela correspond au nombre souhaité d'instances nécessaires pour chaque catégorie. Cet objectif garantit l'uniformité dans toutes les catégories, atténuant ainsi le risque de biais du modèle en faveur de catégories plus fréquentes. Le résultat typique de l'application de cette méthode est que certaines catégories qui ont plus d'échantillons que targetSamples seront sous-échantillonnées tandis que d'autres seront suréchantillonnées pour en produire une proportion égale dans l' ensemble de données de formation. Le pseudocode de l'algorithme 2 montre étape par étape la méthode d'échantillonnage proportionnel de catégorie protégée.

Machine Translated by Google

Algorithme 1 : suréchantillonnage de catégorie protégée

```
baselineCount ← somme des entrées dans 'Largest_Category' de Xtrain
totalCount ← nombre d'entrées dans Xtrain
baselineProportion ← baselineCount/totalCount
BalanceData ← initialiser un ensemble de données vide
catégories ← liste des noms de colonnes dans Xtrain commençant par 'combined_category_'
pour chaque catégorie dans les catégories, faites
    CategoryData ← sélectionner les entrées dans Xtrain où catégorie = 1
    CategoryData ← combiner CategoryData avec les étiquettes correspondantes de ytrain
    categoryCount ← nombre d'entrées danscategoryData
    targetCount ← partie entière de totalCount × baselineProportion
    si CategoryCount < targetCount alors
        sampledData ← exemple targetCount decategoryData avec remplacement
        BalancedData ← ajouter sampledData à BalanceData
    autre
        BalancedData ← ajouter CategoryData à BalanceData
fin si
fin pour
retour de données équilibrées
```

Algorithme 2 Échantillonnage proportionnel de catégorie protégée

```
échantillons cibles ← 5 000
sampledBalanced ← initialiser un ensemble de données vide
pour chaque colonne de new_categories.columns , faites
    CategoryRows ← sélectionner les lignes dans new_categories où column = 1
sampledRows ← exemple d'entrées targetSamples decategoryRows avec remplacement
    pour chaque colonne dans oneHotEncodedBalanced.columns , faites
        lignes échantillonnées[col] ← 0
fin pour
    sampledRows[colonne] ← 1
    sampledBalanced ← ajouter sampledRows à sampledBalanced
fin pour
retour sampledBalanced
```

4.3. SMOTE de catégorie protégée

La technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques de catégorie protégée (PC-SMOTE) La méthode d'échantillonnage est un processus plus complexe visant à imiter SMOTE mais modifié pour échantillonner nos nouvelles catégories, plutôt que les étiquettes de classe. Dans cette approche, la première étape consistait à modifier SMOTE pour utiliser un nombre fixe de voisins et sélectionner au hasard un voisin pour l'interpolation plutôt que de faire la moyenne de tous. Le pseudocode de l'algorithme 3 montre la procédure pour le PC-SMOTE. Puisque l'intention de la méthode est de l'utiliser pour le nouveau échantillonnage de catégories, il ne traite pas directement de la génération d'étiquettes de classe. D'où un nouveau une fonction capable de générer une nouvelle étiquette de classe pour les données synthétiques est nécessaire. Pour cela, un nouveau la fonction est définie et génère des étiquettes de classe en fonction du nombre de nouvelles données synthétiques généré et un rapport d'équilibre présélectionné entre les deux classes. L'algorithme 4 montre comment notre nouvelle fonction génère des étiquettes pour nos échantillons synthétiques. L'algorithme détermine d'abord le nombre d'échantillons pour chaque classe en fonction du ratio d'équilibre et génère l'échantillon nécessaire pour chaque classe. Les étiquettes de classe sont le remaniement pour éviter les biais algorithmiques dans le classes générées.

Ces deux algorithmes sont combinés pour former PC-SMOTE, comme le montre l'algorithme 5.

Dans l'approche visant à atteindre un équilibre multicatégorie, chaque catégorie distincte est itérée sur de telle sorte que le sous-ensemble de données associé à cette catégorie soit identifié. Le nombre d'échantillons synthétiques nécessaires pour atteindre une taille maximale prédéfinie par catégorie est alors calculé. Si des échantillons supplémentaires sont requis, les données sont générées à l'aide de PC-SMOTE,

Machine Translated by Google

qui interpole entre les points de données existants et leurs voisins les plus proches. Parallèlement, une distribution équilibrée d'étiquettes de classe synthétique est créée avec un rapport d'équilibre spécifié par utilisant l'algorithme 4. Ces caractéristiques et étiquettes synthétiques sont ensuite incorporées dans le sous-ensemble de formation pour chaque catégorie. Le processus est répété pour toutes les catégories, ce qui donne lieu à un ensemble de données équilibré. Les hyperparamètres de cet algorithme 5 sont le nombre de voisins et le rapport d'équilibre.

Algorithme 3 Technique de suréchantillonnage de minorités synthétiques personnalisées (SMOTE)

```
procédure CUSTOMSMOTE(données, n_samples)
    SyntheticSamples ← matrice nulle de taille (n_samples× nombre de colonnes dans les données)
nn ← Voisins les plus proches (n_neighbours = 7).fit (données)
    voisins ← nn.kneighbors(data, return_distance = False)
    pour i ← 1 à n_samples faire
        sampleIdx ← entier aléatoire de 0 à (nombre de lignes dans les données − 1)
        nnIdx ← choix aléatoire parmi les voisins[sampleIdx, 1 :]
        di ff ← données[nnIdx] − données[sampleIdx]
        poids ← nombre aléatoire issu d'une distribution uniforme entre 0 et 1
        SyntheticSamples[i] ← données[sampleIdx] + poids × di ff
fin pour
    renvoyer des échantillons synthétiques
fin de la procédure
```

Algorithme 4 Générer des étiquettes synthétiques équilibrées

```
procédure GENBALSYNTHLABELS(n_samplesNeeded, balanceRatio)
    nClass1 ← int (n_samplesNeeded × balanceRatio)
    nClass0 ← n_samplesNeeded − nClass1
    étiquettes synthétiques ← [0] × nClass0 + [1] × nClass1
    SHUFFLE (syntheticLabels) renvoie                    Mélangez les étiquettes au hasard
    les étiquettes synthétiques
fin de la procédure
```

Algorithme 5 SMOTE de catégorie protégée

```
BalanceDataList ← initialiser une liste vide
pour chaque catégorie dans les catégories, faites
    categorySubset ← sélectionner les lignes dans train_data st 'combined_category' == catégorie
    fonctionnalités ← supprimer 'class', 'combined_category' decategorySubset
    nSamples ← max_size− nombre de lignes danscategorySubset
    si nÉchantillons > 0 alors
        SyntheticFeatures ← PCSmote ( fonctionnalités, nSamples)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels (nSamples, balanceRatio)
        caractéristiques synthétiques[′ classe′ ] ← étiquettes synthétiques
        caractéristiques synthétiques[′ Combined_category′ ] ← catégorie
        CategorySubsetBalanced ← concaténer CategorySubset et SyntheticFeatures
    autre
        catégorieSous-ensembleÉquilibré ← catégorieSous-ensemble
fin si
ajouter CategorySubsetBalanced à BalanceDataList
fin pour
BalanceData ← ajouter BalanceDataList et réinitialiser l'index
```

4.4. ADASYN de catégorie protégée

La méthode ADASYN de catégorie protégée imite la minorité synthétique adaptative (ADASYN) échantillonnage mais est légèrement modifié pour atteindre notre objectif d'échantillonnage de catégorie protégée. Notre algorithme PC-ADASYN est présenté dans l'algorithme 6. Il étend ADASYN en se concentrant sur la catégorie

Machine Translated by Google

densité plutôt que le déséquilibre des classes. Plus précisément, cette fonction fonctionne en recherchant le voisins des données, puis en calculant la densité de la catégorie de chaque point de données au sein de sa voisinage immédiat. Il pondère inversement ces densités pour prioriser les catégories minoritaires, ce qui rend plus susceptible de générer des échantillons synthétiques à partir de catégories sous-représentées. Le des échantillons synthétiques sont créés par interpolation entre les points de données sélectionnés et leurs voisins, similaire à SMOTE mais utilisant un poids aléatoire pour faire varier l'interpolation, assurant ainsi un ensemble de données synthétiques diversifiées. Cette approche permet de remédier au déséquilibre au niveau des catégories et enrichit la variance de l'ensemble de données, améliorant potentiellement la robustesse et l'équité des modèles ML formés sur ces données. Puisque cette méthode d'échantillonnage génère également de nouveaux échantillons par interpolation, L'algorithme 4 est utilisé pour générer des étiquettes de classe pour les nouveaux échantillons synthétiques.

Algorithme 6 PC-ADASYN pour l'équilibrage basé sur les catégories

```
procédure PCADASYNCATEGORIES(données, étiquettes, n_samplesNeeded, n_neighbors)
    n_neighbours ← n_neighbours + 1 3 : nn                    Y compris le point de données lui-même
← NearestNeighbours(n_neighbours).fit(data)
    distances, indices ← nn.kneighbors(data)
    densités ← tableau nul de longueur (données)
    pour i ← 0 à length(data) − 1 do
        catégorie_actuelle ← étiquettes[i]
        voisins_indices ← indices[i][1 :] densités[i]          Ignorer l'auto-index
        ← SUM(labels[neighbor_indices] == current_category)
fin pour
    poids ← 1/(densités + 1) poids ←                          Ajoutez 1 pour éviter la division par zéro
    poids/SOMME(poids) échantillons synthétiques              Normaliser les poids
    ← liste vide
    sampleIndices ← choix aléatoire avec remplacement à partir de la longueur (données) à l'aide de poids
    pour chaque idx dans sampleIndices , faites
        baseIdx ← idx
        voisin Idx ← RANDOMCHOICE(indices[baseIdx][1 :])
        di ff ← data[voisin Idx] − data[baseIdx]
        SyntheticSample ← data[baseIdx] + RANDOM() × di ff
        ajouter SyntheticSample à SyntheticSamples
fin pour
    tableau de retour (syntheticSamples)
fin de la procédure
```

Les algorithmes 4 et 6 sont combinés pour former notre échantillonnage ADASYN de catégorie protégée, comme le montre l'algorithme 7. Pour chaque catégorie, les données correspondant à cette catégorie sont isolée et le déficit de taille par rapport à la catégorie la plus grande est calculé. Si supplémentaire des échantillons sont nécessaires, la méthode PC-ADASYN est appliquée, générant des caractéristiques synthétiques qui respecter les caractéristiques de répartition de la catégorie. Ces fonctionnalités sont ensuite complétées avec des étiquettes générées synthétiquement, en maintenant un ratio d'équilibre de classe prédéfini. Le Le processus corrige non seulement les déséquilibres des catégories, mais enrichit également l'ensemble de données, potentiellement améliorer la précision prédictive et l'équité des modèles formés sur ces données.

4.5. Réglage des ensembles de données et des hyperparamètres

Pour tester les quatre méthodes d'échantillonnage, un classificateur était nécessaire pour évaluer les effets sur l'équité et la performance. En fin de compte, le type de classificateur n'est pas directement pertinent puisque le L'objectif est d'atténuer le compromis équité-performance, plutôt que de trouver le meilleur classificateur. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser des arbres de décision univariés basés sur CART [56] en raison de leur robustesse au bruit et aux données manquantes. L'implémentation spécifique que nous avons choisie était extrait de la bibliothèque sklearn (version 1.5.1) [57]. De plus, les arbres de décision nous permettent de contrôlez la force d'ajustement en définissant la profondeur de l'arbre appris. Cela nous permet de comparer l'équité et les performances à différents niveaux d'ajustement.

Machine Translated by Google

Le processus commence par combiner des catégories protégées au sein de chaque ensemble de données, en appliquant un codage ponctuel pour créer de nouvelles fonctionnalités multicatégories, puis en effectuant un codage d'étiquettes. Les ensembles de données ont ensuite été divisés à l'aide d'une validation croisée stratifiée de 10 fois pour garantir une distribution représentative des classes dans chaque pli. Pour chaque pli, la formation a été réalisée sur des données échantillonnées à l'aide des méthodes décrites précédemment, tandis que la classification a été testée sur les ensembles de tests non échantillonnés correspondants. La cohérence dans la formation du modèle a été maintenue en appliquant une profondeur d'arbre identique à toutes les méthodes d'échantillonnage, et les résultats fournis sont des moyennes des exécutions multipliées par 10 avec leurs intervalles de confiance correspondants.

Algorithme 7 ADASYN de catégorie protégée

```
1 : BalanceDataList ← initialiser une liste vide 2 : pour
chaque catégorie dans les catégories,
3 :     fairecategorySubset ← sélectionner parmi new_data3 st 'combined_category' == caractéristiques
4 :     de la catégorie ← supprimer 'class', 'combined_category' decategorySubsetcategoryLabels
5 :     ← extraire 'combined_category' decategorySubset nSamplesNeeded ← max_size
6 :     moins le nombre de lignes dans CategorySubset si nSamplesNeeded > 0 alors
7:      SyntheticFeatures ← PCAdasyn
8 :         ( features, CategoryLabels, nSamplesNeeded) SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels
9 :         (nSamplesNeeded, balanceRatio) SyntheticFeatures [ ′ class′ ] ← SyntheticLabels
dix:        SyntheticFeatures [ ′ y′ ] ← catégorie
11 :        catégorieSubsetBalanced concaténer CategorySubset avec
12 :        SyntheticFeatures sinon CategorySubsetBalanced ← CategorySubset 15 : terminer si 16 : ajouter
13 :
14 :    CategorySubsetBalanced à BalanceDataList 17 : terminer
pour 18 :
BalanceData ← concaténer BalanceDataList et réinitialiser l'index
```

Trois ensembles de données ont été sélectionnés dans le référentiel UCI [58] pour notre analyse : l' ensemble de données Adult Income [59], l'ensemble de données German Credit [60] et l' ensemble de données Correctional Offender Management Profiling for Alternative Sanctions (COMPAS). L'ensemble de données sur le revenu des adultes vise à prédire si un individu gagne plus de 50 000 USD, avec huit attributs catégoriels et quatre attributs numériques, avec des variables protégées correspondant à l'âge (jeune ou adulte), au sexe (homme ou femme) et à la race (blanc ou autres). L'ensemble de données sur le revenu des adultes a été donné à l'UCI en 1996. L'ensemble de données sur le crédit allemand, utilisé pour prédire la solvabilité, comprend 20 attributs catégoriels et deux attributs numériques, avec des variables protégées d'âge et de sexe. L'ensemble de données allemand sur le crédit a été donné à l'UCI en 1994. L'ensemble de données COMPAS [61], qui évalue les taux de récidive aux États-Unis, comprend six caractéristiques catégorielles et six caractéristiques numériques, avec des variables protégées d'âge, de race et de sexe. L'ensemble de données a été publié en 2018. Ces ensembles de données ont été sélectionnés car ils représentent les ensembles de données de pointe pour mesurer les biais et la discrimination et sont largement utilisés dans d'autres études sur les biais algorithmiques et l'équité (voir section 3). De plus, les ensembles de données ont différentes tailles, allant de petite à grande, ce qui les rend adaptés pour tester nos méthodes d'échantillonnage.

Le réglage des hyperparamètres a été effectué à l'aide d'une recherche par grille [62] pour explorer un large éventail de paramètres, complétés par des évaluations visuelles pour identifier les paramètres optimaux qui équilibrent la différence de cotes égalisée (EOD) et la précision. Pour l'ensemble de données Adult Income, les hyperparamètres optimaux comprenaient une profondeur d'arbre maximale de 3 et, pour PC-SMOTE et PC-ADASYN, un paramètre de voisin le plus proche de 5 avec un rapport équilibré de 0,34. Ces paramètres étaient tout aussi efficaces pour l'ensemble de données sur le crédit allemand. Pour l'ensemble de données COMPAS, une profondeur d'arbre maximale de 2 était optimale pour toutes les méthodes d'échantillonnage. PC-SMOTE et PC-ADASYN ont été ajustés au paramètre du voisin le plus proche de 3 et à un rapport équilibré de 0,60.

Machine Translated by Google

5. Résultats

Les quatre stratégies d'échantillonnage ont été appliquées aux trois ensembles de données décrits ci-dessus et ont évalué leur impact à l'aide d'un simple classificateur d'arbre de décision univarié. Les résultats en
Les tableaux 1 à 3 montrent des différences notables dans les performances du modèle selon cinq stratégies d'échantillonnage : pas d'échantillonnage, suréchantillonnage, échantillonnage proportionnel, PC-SMOTE et PC-ADASYN sur nos trois ensembles de données. Chaque méthode a été évaluée en fonction de la précision, de la macro F1, de l'égalisation Différence de cotes (EOD) et parité statistique (SP). Les résultats ont été mesurés en précision et macro F1 car ces deux métriques sont les métriques de classification les plus populaires. Aussi, limiter la métrique à deux rend les résultats comparables pour l'analyse statistique.

Pour vérifier la signification statistique des résultats de chaque méthode, nous avons utilisé la méthode de Friedman test, une alternative non paramétrique à l'ANOVA unidirectionnelle avec mesures répétées. Sur trouvant des résultats significatifs du test de Friedman, nous avons procédé au test post hoc de Nemenyi test. Ce test est utilisé pour évaluer des comparaisons par paires entre les méthodes afin de déterminer quelles méthodes diffèrent statistiquement les unes des autres. Le test Nemenyi est avantageux dans ce paramètre car il prend en compte plusieurs comparaisons sans supposer que c'est normal distributions, fournissant ainsi un moyen robuste de comprendre les différences spécifiques par paire.

Pour l'ensemble de données sur le revenu des adultes (tableau 1), la méthode sans échantillonnage a donné une précision de 0,82, établissant une référence élevée pour la comparaison. Toutefois, elle démontre une approche légèrement biaisée prédiction avec un EOD de 0,36 et une disparité minimale dans les taux de prédiction (SP = 0,02). Dans contraste, le suréchantillonnage a conservé la même précision mais a légèrement abaissé la macro F1 à 0,65, indiquant des problèmes de surajustement potentiels tout en détériorant l'équité (EOD = 0,66) et disparité croissante dans les taux de prédiction (SP = 0,09). L'échantillonnage proportionnel a diminué précision à 0,79 mais a amélioré la macro F1 à 0,79, suggérant un meilleur équilibre entre précision et rappel. Cependant, il a considérablement augmenté SP à 0,71, ce qui indique une augmentation substantielle disparité des taux de prédiction positive, ce qui soulève des inquiétudes quant à l'équité du modèle. Le deux approches personnalisées pour SMOTE et ADASYN ont été conçues spécifiquement pour améliorer sur ces mesures. PC-SMOTE a montré une performance modérée avec une précision de 0,81 et un EOD amélioré de 0,25, suggérant une équité améliorée par rapport au suréchantillonnage de base et la méthode sans échantillonnage. Cependant, il a toujours enregistré un macro F1 inférieur (0,63), indiquant problèmes de fausses déclarations dans la génération de données synthétiques. PC-ADASYN s'est avéré être le approche la plus équilibrée, maintenant une grande précision (0,82) et une meilleure gestion de la classe déséquilibres, avec une amélioration modérée de l'équité (EOD = 0,28) et une augmentation de la disparité du taux de prédiction (SP = 0,09). Dans l'ensemble, la précision de base est statistiquement significativement meilleur que l'échantillonnage proportionnel alors qu'il n'est pas statistiquement significatif car par rapport aux autres méthodes d'échantillonnage. Pour la macro F1, l'échantillonnage proportionnel est statistiquement significativement meilleur que les autres méthodes d'échantillonnage. Pour l'EOD, PC-ADASYN est statistiquement meilleure que les autres méthodes d'échantillonnage tandis que la méthode sans échantillonnage SP est statistiquement significativement meilleur que les autres méthodes d'échantillonnage.

Tableau 1. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données sur le revenu des adultes avec des intervalles de confiance de 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Aucun échantillonnage	0,82 ± 0,00	0,66 ± 0,01	0,36 ± 0,18	0,02 ± 0,00
Suréchantillonnage	0,82 ± 0,02	0,65 ± 0,06	0,66 ± 0,2	0,09 ± 0,02
Échantillon prop.	0,79 ± 0,05	0,79 ± 0,06	0,46 ± 0,12	0,71 ± 0,10
PC-SMOTE	0,81 ± 0,05	0,63 ± 0,07	0,25 ± 0,21	0,07 ± 0,00
PC-ADASYN	0,82 ± 0,04	0,64 ± 0,07	0,28 ± 0,19	0,09 ± 0,02

Les résultats des expériences sur l'ensemble de données du crédit allemand montrent également des impacts variables de chaque stratégie d'échantillonnage, notamment en ce qui concerne l'équité et l'exactitude, comme le montre le tableau 2. Sans échantillonnage, le modèle de référence a atteint une précision de 0,72 mais a montré des résultats significatifs. biais dans sa prédiction, avec un EOD de 0,88, indiquant une disparité substantielle d'erreur taux entre les groupes dans les attributs protégés. Implémentation du suréchantillonnage maintenue précision tout en améliorant la macro F1 à 0,68 et en réduisant notamment l'EOD à 0,37, quoique à

Machine Translated by Google

le coût de l'augmentation du SP à 0,35, mettant en évidence un compromis potentiel entre différentes équités mesures. L'échantillonnage proportionnel a légèrement réduit la précision à 0,68 mais a obtenu le meilleur Score F1 de 0,69. Il a également abaissé l'EOD à 0,32, ce qui suggère qu'il équilibre efficacement les prévisions. qualité avec équité. PC-SMOTE montre une amélioration de la précision avec 0,73 mais une valeur inférieure macro F1 de 0,55 ; l'équité du modèle montre une énorme amélioration par rapport à la référence avec un EOD de 0,15 et un SP modéré de 0,1. PC-ADASYN montre une précision similaire à celle du la ligne de base est à 0,72, mais avec le F1 macro le plus bas de 0,48, ce qui suggère un compromis potentiel en précision et en rappel. Cependant, le modèle présente la meilleure prédiction d'équité avec un EOD de 0,13 et un SP de 0,06. Dans l'ensemble, le résultat montre que la précision de l'absence d'échantillonnage n'est pas statistiquement significatif par rapport aux autres méthodes d'échantillonnage, à l'exception des échantillonnages proportionnels tandis que pour l'EOD, les résultats de toutes les méthodes d'échantillonnage sont statistiquement significatifs en comparaison avec la méthode sans échantillonnage.

Tableau 2. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données du crédit allemand avec des intervalles de confiance à 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Pas d'échantillonnage	0,72 ± 0,03	0,62 ± 0,06	0,88 ± 0,10	0,07 ± 0,01
Suréchantillonnage	0,72 ± 0,05	0,68 ± 0,04	0,37 ± 0,16	0,35 ± 0,11
Prop. Échantillon	0,69 ± 0,04	0,69 ± 0,07	0,32 ± 0,26	0,29 ± 0,10
PC-SMOTE	0,73 ± 0,05	0,55 ± 0,09	0,15 ± 0,09	0,1 ± 0,02
PC-ADASYN	0,72 ± 0,03	0,48 ± 0,11	0,13 ± 0,02	0,06 ± 0,00

Le tableau 3 montre les résultats de notre expérience avec l'ensemble de données COMPAS. Ces résultats révèlent des variations significatives dans les performances du modèle selon les différentes stratégies d'échantillonnage. L'approche de base, sans échantillonnage, a atteint une précision et un score macro F1 de 0,89 mais a montré des disparités plus élevées dans les mesures d'équité, avec une différence de cotes égalisée (EOD) de 0,39 et une parité statistique (SP) de 0,29. Cela souligne les biais potentiels qui des modèles non ajustés peuvent s'afficher envers des groupes protégés. L'application du suréchantillonnage précision légèrement améliorée à 0,90 mais également amélioration notable de l'équité, diminuant l'EOD à 0,26. Cela suggère une efficacité dans la réduction des disparités dans les résultats sans compromettre SP. À l'inverse, l'échantillonnage proportionnel, tout en augmentant la précision et le macro F1 à 0,90 et 0,91, respectivement, a également atteint un EOD de 0,26, l'améliorant par rapport à la référence tout en enregistrant également un SP plus élevé de 0,36, indiquant une augmentation potentielle de la disparité des résultats positifs résultats à travers les groupes. PC-SMOTE et PC-ADASYN, avec des scores identiques en précision, macro F1 et SP ont réussi à maintenir les améliorations d'équité avec un EOD de 0,30, bien que ces méthodes aient également augmenté le SP à 0,47. Dans l'ensemble, les résultats montrent que tant la précision et l'EOD de nos méthodes d'échantillonnage sont statistiquement significativement meilleures que la méthode sans échantillonnage.

Tableau 3. Résultats des méthodes d'échantillonnage sur l'ensemble de données COMPAS avec des intervalles de confiance à 95 %.

Échantillonnage Méthode	Précision	Macro F1	NEM	PS
Pas d'échantillonnage	0,89 ± 0,04	0,89 ± 0,04	0,39 ± 0,15	0,29 ± 0,17
Suréchantillonnage	0,90 ± 0,03	0,90 ± 0,05	0,26 ± 0,14	0,25 ± 0,07
Prop. Échantillon	0,90 ± 0,05	0,91 ± 0,04	0,26 ± 0,12	0,36 ± 0,10
PC-SMOTE	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,02	0,30 ± 0,11	0,47 ± 0,19
PC-ADASYN	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,03	0,30 ± 0,13	0,47 ± 0,21

6. Discussion

Les résultats des expériences sur les trois ensembles de données confirment que la catégorie protégée l'échantillonnage peut améliorer considérablement l'équité du modèle, souvent sans compromettre de manière significative la précision des prévisions. Dans certains cas, une amélioration de la précision et de la macro F1 a également été démontré. Se concentrer sur les résultats de l'ensemble de données sur le revenu des adultes, PC-SMOTE et PC-ADASYN

Machine Translated by Google

ont démontré des améliorations notables de l'EOD et maintenu des niveaux modérés de SP. L' efficacité de ces méthodes peut être largement attribuée à leurs techniques d'interpolation sophistiquées. Par exemple, un examen visuel des arbres de décision générés sans échantillonnage et PC-ADASYN fournit des contrastes perspicaces. Des exemples provenant d'un seul pli représentatif sont présentés respectivement dans les figures 1 et 2. L'arbre de décision appris sans échantillonnage a sélectionné sa racine avec une caractéristique étroitement associée aux attributs protégés, agissant ainsi comme un attribut proxy. Cela a conduit à un biais de prédiction prononcé, comme en À l'inverse, l'arbre de décision formé sur les données générées à l'aide de PC-ADASYN a commencé avec une fonctionnalité qui généralisait très bien les prédictions et atténuait les biais, comme en témoigne une amélioration notable de l'équité du modèle et une impureté de Gini plus élevée, indiquant une division initiale plus pure.

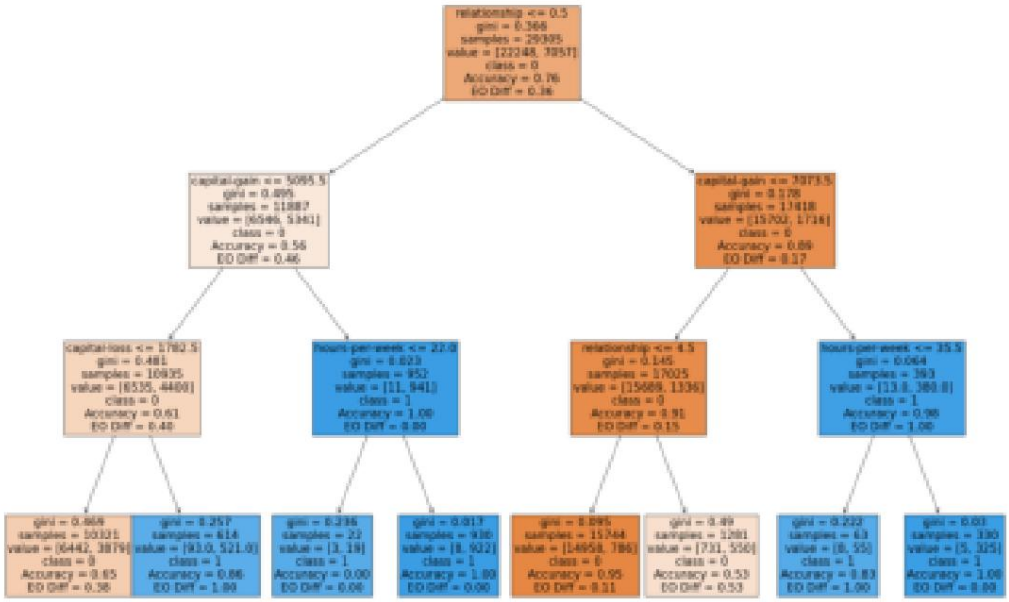


Figure 1. Exemple d'arbre de décision formé sur le revenu des adultes sans échantillonnage.

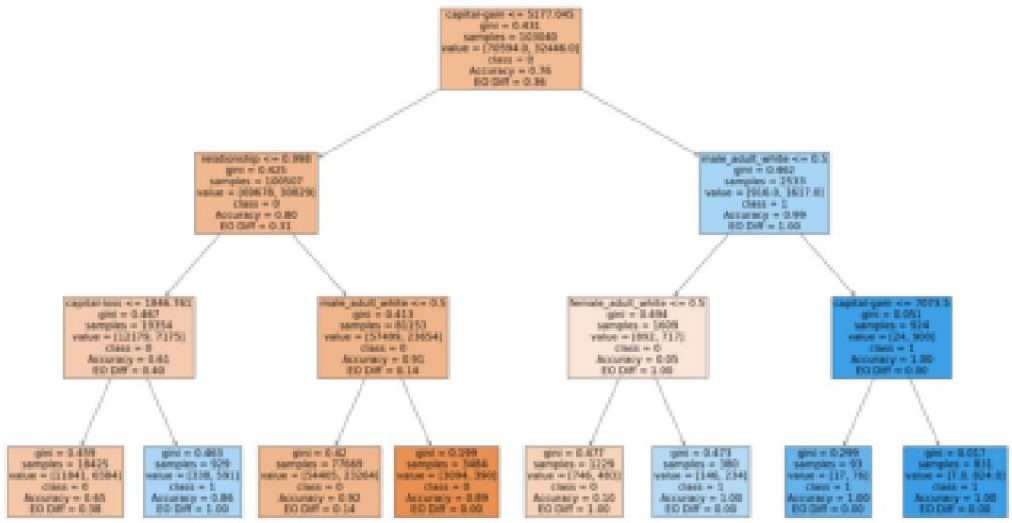


Figure 2. Arbre de décision de PC-ADASYN sur le revenu des adultes.

Machine Translated by Google

6.1. Comparaison de l'équité et de la performance

En comparant le suréchantillonnage et l'échantillonnage proportionnel, les approches des méthodes visant à augmenter la taille de l'échantillon en dupliquant les lignes de données existantes étaient simples et n'ont pas apporté d'améliorations substantielles en matière d'EOD. Ce résultat est logique puisque ces méthodes ont tendance à reproduire les préjugés existants, ce qui peut potentiellement exacerber les problèmes d'équité plutôt que de les atténuer. Cela est particulièrement évident lorsque l'on considère l'ensemble de données sur le revenu des adultes, où les classes sont extrêmement déséquilibrées. Ces stratégies de réplication naïves ne disposent pas de la capacité d'interpolation de PC-SMOTE et PC-ADASYN pour ajuster les échantillons à proximité des limites de décision, ce qui est crucial pour atténuer les biais dans l'ensemble de données. En revanche, les stratégies d'interpolation utilisées par SMOTE et ADASYN élargissent l'ensemble de données et améliorent sa diversité. Ceci est particulièrement efficace pour les échantillons proches des limites de décision, où de légers changements dans les caractéristiques peuvent affecter de manière significative l'équité des prédictions. En interpolant entre les échantillons, SMOTE et ADASYN déplacent efficacement ces échantillons limites vers des régions plus équitables de l'espace des caractéristiques, confrontant ainsi directement et réduisant les biais plus efficacement que les méthodes qui augmentent le volume d'échar
La fonction de génération de classes (algorithme 4) contribue également à augmenter la répartition globale des classes.
Les résultats de nos PC-SMOTE et PC-ADASYN sur le revenu des adultes montrent également une supériorité sur les résultats obtenus dans [41], où une précision de 0,59 et un SP de 0,17 ont été obtenus.
De plus, les résultats de PC-SMOTE et PC-ADASYN montrent une supériorité sur les résultats obtenus dans [40], où une EOD de 0,89 et une précision légèrement meilleure de 0,84.

En examinant les résultats de l'ensemble de données sur le crédit allemand, nous avons observé une tendance similaire à celle observée dans l'ensemble de données sur le revenu des adultes : la méthode sans échantillonnage présente un biais très élevé concernant l'EOD. Le faible SP de 0,07 indique une disparité minime dans les taux de prédiction positive entre les groupes, mais ce n'est pas en soi un bon moyen de mesurer l'équité puisque le groupe favorisé a plus d'échantillons que le groupe défavorisé. Cela a pour effet de fausser le calcul du SP puisqu'il ne prend en compte que les décisions positives dans chaque groupe, qui sont influencées par la taille de l'échantillon. L'un des points à retenir est l'importance d'utiliser plusieurs mesures d'équité pour visualiser de manière globale l'impact d'un modèle sur toutes les parties prenantes. Pour le suréchantillonnage, nous avons constaté une amélioration de l'EOD avec un SP similaire ; cela montre que l'augmentation du nombre d'échantillons pour chacun des attributs protégés de la multicatégorie améliore l'équité par rapport à l'EOD. De plus, le SP mis à jour reflète ce à quoi ressemblera un nombre plus égal d'échantillons pour chaque multicatégorie, contrairement à la ligne de base où le groupe favorisé a cinq fois plus d'échantillons que le groupe défavorisé. La précision de l'échantillonnage proportionnel diminue car le nombre de base d'échantillons sélectionnés après le réglage des hyperparamètres était insuffisant pour que le modèle généralise l'ensemble de tests non échantillonné, conduisant à un surajustement. Le surapprentissage a été confirmé en considérant la précision de l'entraînement. Il est intéressant de noter que le modèle n'échange pas la précision contre le rappel comme les autres modèles, ce qui donne à l'échantillonnage proportionnel la macro F1 la plus élevée.

En ce qui concerne l'équité, nous avons constaté une augmentation de l'EOD par rapport à la référence et au suréchantillonnage . Cela est dû au fait que chaque multicatégorie est représentée sur les mêmes décomptes de base. Cela peut améliorer l'équité du modèle, car celui-ci a désormais une vision plus large des catégories et permet de meilleures prédictions et, en fin de compte, de décisions plus équitables. PC-SMOTE et PC-ADASYN jouent un rôle central en réduisant considérablement les biais dans les prédictions des modèles. Cette cohérence a confirmé la robustesse de ces méthodes sur différents ensembles de données. Notamment , aucune des deux méthodes ne compromet la précision alors que les deux améliorent l'équité, illustrant leur efficacité dans la gestion des compromis généralement associés à la modélisation prédictive.
Ces résultats démontrent les fortes capacités d'interpolation inhérentes à PC-SMOTE et PC-ADASYN. Ces méthodes réattribuent efficacement les échantillons dans l'espace des caractéristiques, en particulier en déplaçant ceux des régions défavorisées des limites de décision négatives vers des limites de décision plus positives . De tels ajustements sont essentiels pour atténuer les résultats biaisés et promouvoir l'équité dans les processus décisionnels automatisés. La macro F1 dans les deux modèles diminue par rapport à la référence car un nombre plus élevé d'échantillons est requis pour que le modèle fonctionne mieux en généralisation, ce que cet ensemble de données ne prend pas en charge. Plus précisément, l'ensemble de données contient 700 échantillons pour la classe 0 et 300 échantillons pour la classe 1, ce qui signifie que l'ensemble de test

Machine Translated by Google

ne contient que 30 échantillons pour la classe 1. Ce petit nombre d'échantillons a amené les deux modèles à échanger le rappel contre la précision en classe 1. Notamment, nous avons constaté un faible rappel pour la classe 1, ce qui conduit finalement à un faible score f1 pour la classe 1 et depuis la macro F1 fait la moyenne des deux scores f1 et les traite de la même manière, cela affecte les performances des deux modèles en macro F1. Dans l'ensemble, les deux modèles donnent un modèle plus juste avec une bonne précision par rapport à la méthode de référence et aux deux autres méthodes d'échantillonnage.

L'évaluation de l'ensemble de données COMPAS valide en outre l'efficacité de nos méthodes d'échantillonnage . Les tendances distinctes qui émergent s'alignent sur celles observées dans les ensembles de données sur le revenu des adultes et le crédit allemand, soulignant la robustesse de nos résultats. Notamment, les techniques de suréchantillonnage et d'échantillonnage proportionnel ont démontré des améliorations substantielles en termes de différence de cotes égalisées (EOD) et de précision, tandis que le suréchantillonnage s'améliore également notablement en SP. Cette amélioration est probablement due à la composition et à l'équilibre uniques au sein de l'ensemble de données COMPAS, contrairement aux autres ensembles de données dans lesquels les classes sont déséquilibrées. Le succès du suréchantillonnage et de l'échantillonnage proportionnel dans ce contexte peut être attribué à la nature équilibrée de l'ensemble de données, qui permet une duplication répétée des lignes existantes (techniques d'échantillonnage employées par ces méthodes) pour améliorer l'ensemble de données sans introduire de biais significatif vers un élément particulier. classe. Cette méthode augmente efficacement la représentation de toutes les classes et des attributs protégés sous une forme équilibrée, ce qui rend ces techniques particulièrement efficaces pour les ensembles de données où les domaines de caractéristiques contribuent de manière égale aux prédictions et où les distributions initiales de classes ne souffrent pas de déséquilibre sévère . Cela peut en outre être vérifié à partir de leur macro F1, car aucun des modèles n'échange de précision contre un rappel. L'amélioration de SP dans le suréchantillonnage peut être attribuée au nombre plus élevé d'échantillons en suréchantillonnage par rapport à l'échantillonnage proportionnel. Concernant PC-SMOTE et PC-ADASYN, ces algorithmes montrent une amélioration par rapport à la référence en termes de précision et d'EOD. Ces tendances suivent celles des résultats précédents. Une chose notable à cet égard se traduit par la forte baisse de SP qui peut être attribuée à notre nouvelle étiquette qui a été générée pour que l'ensemble de données soit biaisé vers la classe négative. Ces résultats montrent la difficulté d'optimiser deux ou plusieurs mesures d'équité à la fois et comment cette optimisation peut s'influencer mutuellement.

6.2. Impact de la profondeur de l'arbre sur l'équité et la précision

Dans cette étude, l'impact de la profondeur de l'arbre de décision sur les performances du modèle a également été étudié, en examinant spécifiquement comment les variations de la profondeur de l'arbre influencent la précision et l'EOD. Comprendre l'effet de la profondeur est crucial car cela donne un aperçu des effets allant du sous-apprentissage au surapprentissage et aide à identifier le niveau de complexité optimal auquel la précision et l'équité sont maximisées. Initialement, l'arbre de décision pouvait croître sans contraintes sur toute sa profondeur, soit en moyenne environ 30 branches. L' arbre a ensuite été examiné visuellement pour en déduire la profondeur maximale en excluant les branches non fendues. Pour analyser systématiquement les effets de la profondeur des arbres, la profondeur maximale des arbres a pu varier de 1 à 30. Chaque limite de profondeur a été évaluée à l'aide d'une validation croisée dix fois pour garantir la robustesse et la généralisabilité des résultats.

Pour chaque configuration de profondeur d'arbre, la précision et l'EOD ont été mesurées sur l' ensemble de test. De plus, des intervalles de confiance de 95 % ont été calculés pour les mesures des dix volets. Cette analyse statistique a mis en évidence la profondeur avec laquelle l'arbre de décision équilibrait le compromis entre précision et équité tout en prenant également en compte le compromis statistique sous-jacent biais-variance. Ce faisant, il a été possible d'identifier le « point idéal », un point délicat où l'arbre de décision maintient une précision prédictive élevée sans compromettre l'équité, contrecarrant ainsi le compromis souvent cité et présenté dans la littérature précéden
Les figures 3 à 7 montrent les tracés de précision et d'EOD par rapport à la profondeur maximale pour chacune des cinq méthodes d'échantillonnage de l'ensemble de données sur le revenu des adultes.

Machine Translated by Google

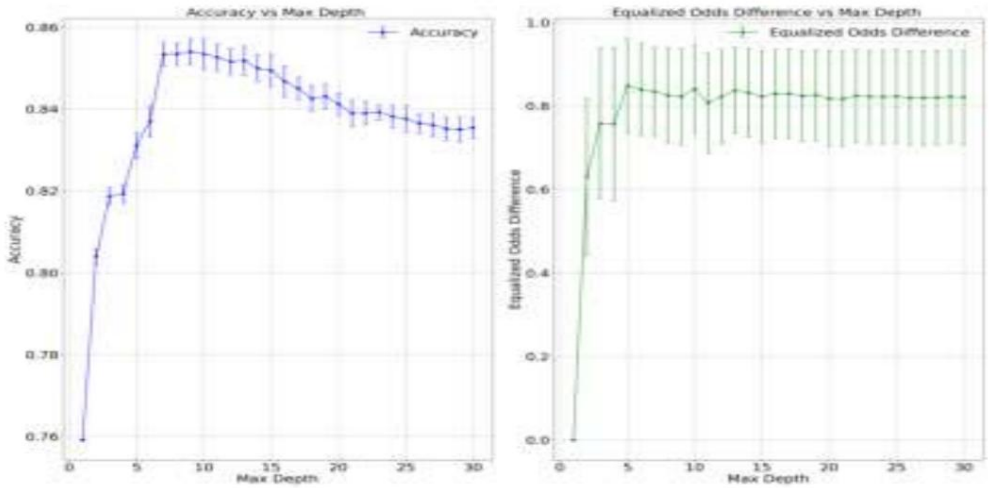


Figure 3. Graphiques du revenu des adultes sans échantillonnage, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale des arbres allant de 1 à 30.

Sur la base de résultats tels que ceux présentés dans les figures 3 et 4, il y a une augmentation initiale notable de la précision à mesure que la profondeur maximale augmente pour les méthodes sans échantillonnage et avec suréchantillonnage . Cependant, les deux méthodes présentent une baisse de précision à partir d'une profondeur de 10, suggérant l'apparition d'un surapprentissage. En conséquence, l'EOD diminue fortement avec l'augmentation de la profondeur jusqu'à environ 10 profondeur, au-delà de laquelle elle se stabilise. Cette tendance indique que même si les arbres plus profonds améliorent initialement l'équité, ils atteignent finalement un seuil au-delà duquel aucun gain supplémentaire n'est observé. Rappelant que l'objectif d'équité était de minimiser l'EOD, une observation clé est que le réglage de la profondeur maximale entre trois et cinq établit un équilibre optimal entre l'obtention d'une grande précision et le

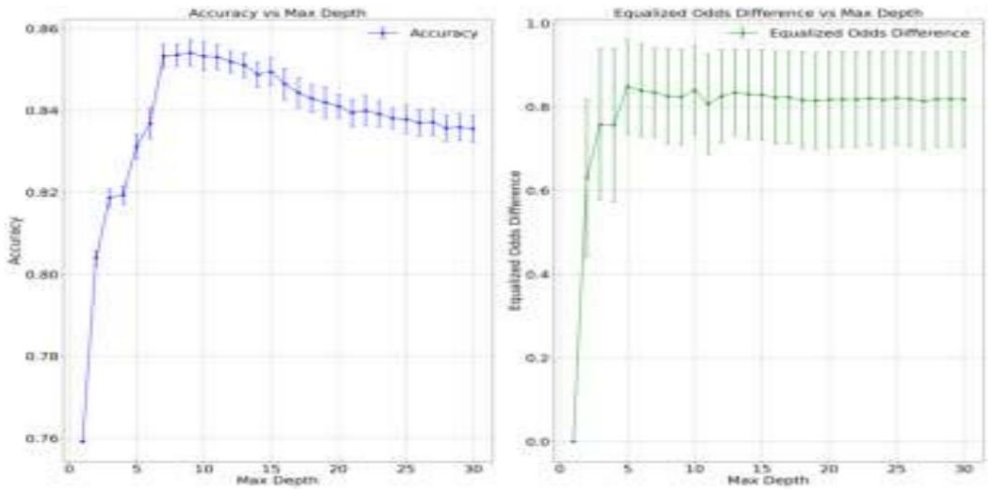


Figure 4. Graphiques du revenu des adultes utilisant le suréchantillonnage, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

Lorsque l'on considère les résultats présentés dans la figure 5, la méthode d'échantillonnage proportionnel augmente continuellement la précision avec la profondeur de l'arbre, culminant à une profondeur d'environ 26. À l'inverse, l'EOD augmente initialement avant de diminuer et de se stabiliser à une profondeur d'environ 15. Les larges intervalles de confiance observés dans la métrique EOD suggèrent une variabilité significative dans les résultats en matière d'équité. Cette découverte souligne l'importance de sélectionner une profondeur qui minimise la variabilité de l'équité tout en maximisant la précision.

Machine Translated by Google

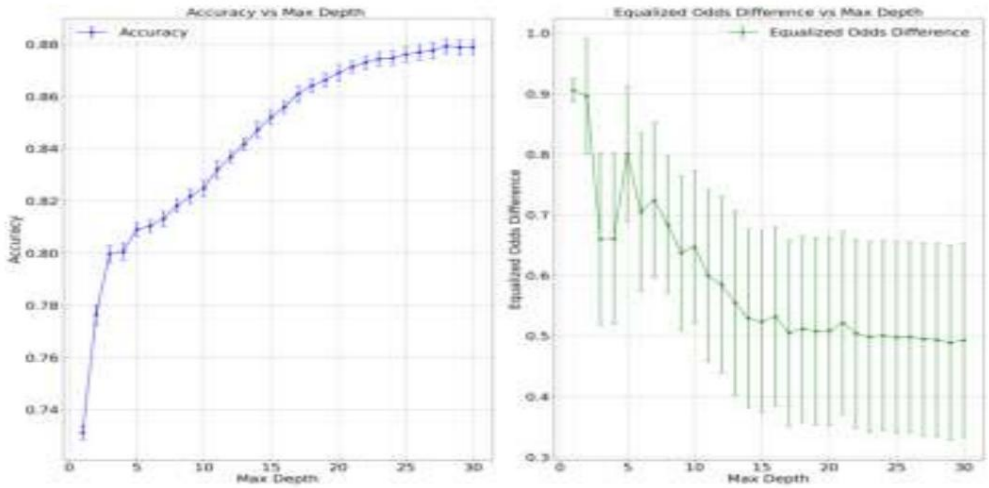


Figure 5. Graphiques du revenu des adultes utilisant un échantillonnage proportionnel, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale des arbres allant de 1 à 30.

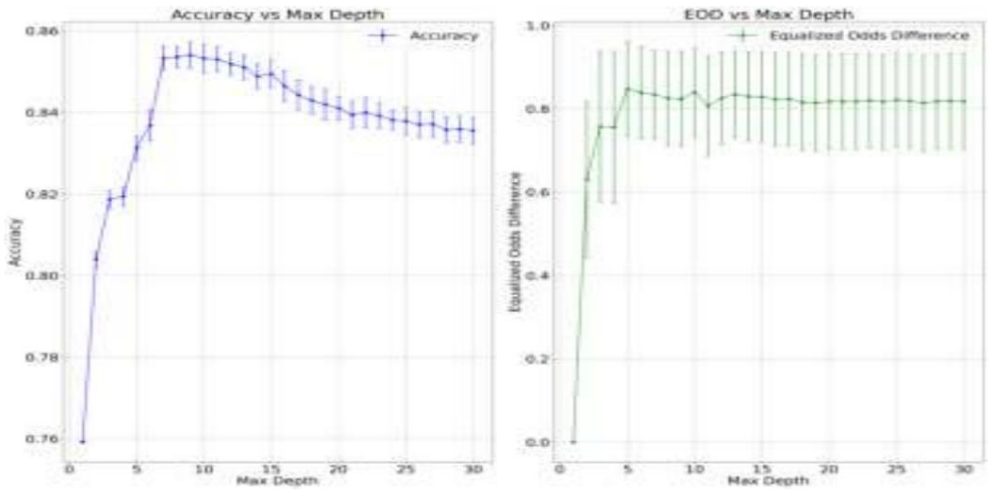


Figure 6. Graphiques du revenu des adultes utilisant PC-SMOTE, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

Les figures 6 et 7, représentant respectivement les résultats utilisant PC-SMOTE et PC-ADASYN, présentent de légères tendances à la baisse en termes de précision, qui s'améliorent brièvement avant de redescendre, une tendance indiquant un surapprentissage à de plus grandes profondeurs. Les mesures EOD de ces méthodes montrent une stabilité initiale aux profondeurs inférieures, une augmentation aux profondeurs moyennes et un déclin, suggérant des interactions complexes entre la génération d'échantillons synthétiques et la délimitation des limites de décision . Compte tenu de ces observations, une profondeur maximale de 3 a été choisie pour nos expériences, car elle représente un « point idéal » où la précision et l'EOD sont optimisées.

Compte tenu de ces résultats, une conclusion consiste à remettre en question le compromis souvent présumé entre exactitude et équité en démontrant que notre méthode PC-ADASYN surpasse systématiquement les références dans les trois ensembles de données en termes d'exactitude et d'équité. Cette découverte est significative, car elle suggère qu'il est possible d'améliorer l'équité du modèle sans sacrifier la précision grâce à des méthodes d'échantillonnage appropriées et qu'un réglage du modèle est possible. Cependant, notre analyse révèle également des scénarios dans lesquels les ajustements de la complexité du modèle, en particulier la profondeur maximale des arbres de décision, peuvent améliorer la précision au détriment de l'équité, comme l'indique l'augmentation de la différence de cotes égalisée (EOD). On s'attend toutefois à ce que le couplage de méthodes d'échantillonnage avec des méthodes de traitement telles que la régularisation basée sur l'équité puisse compenser ces effets. Ces décisions mettent en évidence le pouvoir discrétionnaire des chercheurs pour équilibrer les mesures de performance des modèles en fonction des objectifs et des contraintes spéc

La quantité d'échantillon et la complexité temporelle sont comme toutes les autres méthodes d'échantillonnage. Comme le

Machine Translated by Google

la quantité d'échantillon augmente, la complexité temporelle augmente mais dans l'ensemble, les méthodes d'échantillonnage ont la même complexité temporelle que leurs algorithmes sous-jacents car elles ont les mêmes fonctionnalités.

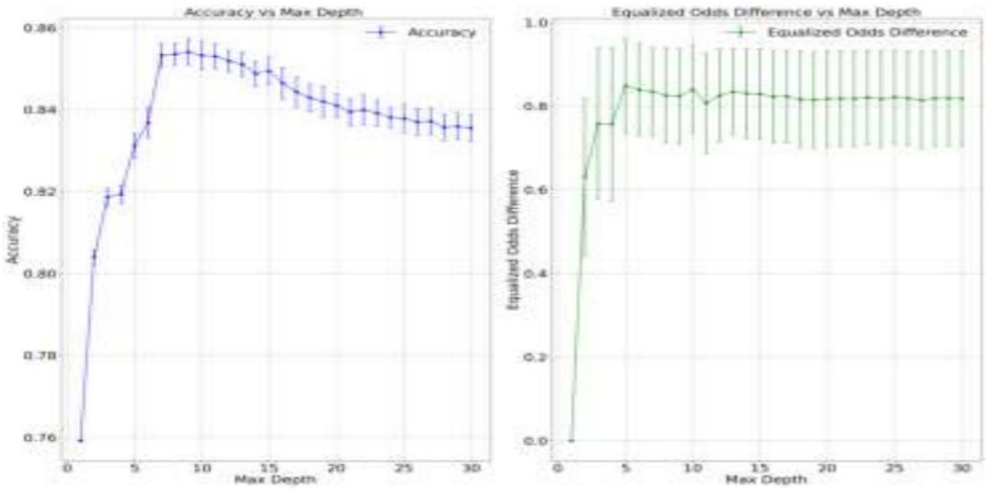


Figure 7. Graphiques du revenu des adultes utilisant PC-ADASYN, montrant la précision et l'EOD avec des intervalles de confiance de 95 % par rapport à la profondeur maximale de l'arbre allant de 1 à 30.

De plus, nos résultats soulignent la complexité de l'optimisation simultanée de plusieurs mesures d'équité. Par exemple, les efforts visant à améliorer la parité statistique (SP) en favorisant des prédictions plus positives pour chaque groupe protégé dans l'ensemble de données COMPAS ont conduit à une réduction involontaire des prédictions négatives. Ce changement a eu un impact négatif sur le taux de faux positifs (FPR), une composante de l'EOD, aggravant ainsi la métrique EOD à mesure que SP s'améliorait. Ce phénomène illustre les tensions mathématiques inhérentes entre les mesures d'équité, où l'optimisation de l'une peut nuire à l'autre. L'ensemble de données COMPAS, avec sa distribution de classes presque équilibrée, fournit un exemple concret de la façon dont les caractéristiques de l'ensemble de données peuvent influencer le comportement des mesures d'équité. L'optimisation de SP dans ce contexte implique une mesure biaisée de l'équité, en particulier là où des différences inhérentes existent entre les groupes dans les attributs protégés. Ceci est étayé par la littérature indiquant que SP peut ne pas tenir compte de manière adéquate des différences de groupe, conduisant potentiellement à des conclusions trompeuses sur l'équité d'un modèle (63).

7. Limites et travaux futurs

La nature même de cette étude est telle qu'il n'est pas possible d'aborder toutes les questions liées à l'équité et au soi-disant compromis équité-performance. Il existe donc des limites aux travaux rapportés ici. Néanmoins, nous espérons et avons l'intention que les travaux rapportés ici suggèrent des pistes d'exploration supplémentaires dans ce domaine important.

L'une des limites de cette étude est que notre méthode d'échantillonnage n'a pas été spécifiquement conçue pour optimiser des mesures d'équité arbitraires. En d'autres termes, étant donné qu'il existe souvent des compromis inhérents entre l'ensemble disponible de mesures d'équité, la décision a été prise de se concentrer sur une approche indépendante des mesures, en reconnaissant que les résultats auraient pu différer pour d'autres mesures. C'est également en partie la raison pour laquelle nous avons constaté des comportements différents entre EOD et SP.

En outre, il est reconnu que, même si la méthode ML sous-jacente ne devrait pas être pertinente pour la méthode proposée, elle n'a pas réellement été testée. Par conséquent, à l'avenir, cette recherche sera étendue en considérant les impacts d'autres algorithmes de ML tels que la régression logistique, l'ID3 flou, le K-plus proche voisin et les méthodes d'ensemble telles que les forêts aléatoires ou les arbres boostés par gradient pour évaluer la généralisabilité de notre de nouvelles méthodes d'échantillonnage. Le but d'une telle étude serait de vérifier que nos méthodes sont indépendantes de l' algorithme ML utilisé. En outre, cela permettrait de valider si les améliorations observées en matière d'équité et d'exactitude sont spécifiques au modèle ou peuvent être appliquées universellement.

Machine Translated by Google

De plus, il est reconnu que seuls trois ensembles de données distincts ont été pris en compte, des ensembles de données qui ont été largement étudiés dans le domaine. Cela soulève la crainte que les méthodes soient adaptées à ces données plutôt que d'aborder la question plus large de l'équité du ML. Pour résoudre ce problème, des expériences avec des ensembles de données plus vastes et plus diversifiés sont prévues afin de fournir des informations plus approfondies sur l'évolutivité et la robustesse de nos techniques. Un autre domaine de travail futur consiste à affiner notre approche d'échantillonnage multicatégorie en incorporant des subdivisions plus granulaires des catégories protégées, révélant potentiellement des biais plus subtils et fournissant une compréhension plus nuancée de l'équité.

Enfin, il est reconnu que des méthodes alternatives ont été proposées pour atténuer les biais , et ces méthodes n'ont pas du tout été étudiées dans ce travail. Les travaux futurs impliqueraient des comparaisons avec davantage de stratégies d'échantillonnage. Une comparaison plus directe des méthodes proposées avec les méthodes de traitement et de post-traitement sera effectuée. Par exemple , l'incorporation de méthodes de traitement, telles que la régularisation [22], ou une méthode de post-traitement, telle que l'optimiseur de seuil randomisé [64], sera explorée comme moyen possible d'obtenir de nouvelles améliorations en termes d'équité et de performances.

8. Conclusions

Dans cette étude, la question du biais dans les prédictions ML a été étudiée et une méthode a été développée basée sur la combinaison de variables protégées dans une nouvelle multicatégorie. En particulier, l'accent a été mis sur la question suggérée dans la littérature concernant le compromis biais-performance et sur la recherche d'une méthode pour atténuer ce compromis. La nouvelle approche multicatégorie proposée reflète l'identité multiforme des individus, reconnaissant l'interaction complexe des attributs qui définissent les scénarios du monde réel. Compte tenu du déséquilibre inhérent à cette multicatégorie, quatre méthodes d'échantillonnage adaptées à ces catégorisations complexes, plutôt que les étiquettes de classe traditionnelles, ont été développées. Afin d'appliquer un classificateur de base, des arbres de décision ont été formés et l'efficacité de ces méthodes a été évaluée à l'aide de trois ensembles de données souvent utilisés dans les études d'équité. Les performances des méthodes ont été comparées aux méthodes de base sans échantillonnage, en utilisant la précision, la macro F1, la différence de cotes égalisée (EOD) et la parité statistique (SP) comme mesures d'évaluation.

Les résultats des expériences indiquent que deux des techniques d'échantillonnage nouvellement développées – PC-SMOTE et PC-ADASYN – améliorent avec succès l'équité sans compromettre la précision. Remarquablement, dans certains cas, ces méthodes ont également amélioré la précision, fournissant ainsi des preuves contraires aux affirmations populaires selon lesquelles il existe un compromis entre équité et performance. Une analyse plus approfondie de l'impact de la profondeur maximale des arbres sur les performances du modèle a révélé que, même si l'augmentation de la profondeur augmente initialement la précision, elle conduit finalement à une baisse. À l' inverse, l'augmentation de la profondeur nuit à l'équité, soulignant le défi de concilier complexité et équité. Cependant, des profondeurs d'arbre optimales ont été identifiées, améliorant simultanément la précision et l'EOD, soulignant la possibilité d'atteindre l'équité sans sacrifier les performances.

En fin de compte, ces résultats remettent en question les notions dominantes d'un compromis implicite entre performance et équité dans la recherche sur l'atténuation des biais, suggérant que des stratégies d'atténuation des biais soigneusement conçues ont la capacité d'éviter ce compromis. Notre approche crée un nouveau précédent pour le développement d'algorithmes prédictifs plus équitables en redéfinissant la manière dont les attributs protégés sont utilisés dans la formation des modèles.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, GP et JS ; analyse formelle, GP et JS ; enquête, médecin généraliste; méthodologie, médecin généraliste; logiciel, médecin généraliste; supervision, JS; validation, GP et JS ; visualisation, médecin généraliste ; rédaction – ébauche originale, GP ; rédaction – révision et édition, JS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les ensembles de données et le code mis en œuvre dans ce travail de recherche ont été téléchargés sur https://github.com/horlahsunbo/New-folder (consulté le 10 juin 2024).

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Machine Translated by Google

Les références

1. Maina, IW ; Belton, TD ; Ginzberg, S. ; Singh, A. ; Johnson, TJ Une décennie d'étude des préjugés raciaux/ethniques implicites dans les soins de santé fournisseurs utilisant le test d'association implicite. Soc. Sci. Méd. 2018, 199, 219-229. [Référence croisée]
2. Salimi, B. ; Rodriguez, L. ; Howe, B. ; Suciu, D. Réparation causale de bases de données pour l'équité algorithmique. Dans Actes de la Conférence internationale 2019 sur la gestion des données, Amsterdam, Pays-Bas, 30 juin-5 juillet 2019 ; pp. 793-810.
3. Kordzadeh, N. ; Ghasemaghaei, M. Biais algorithmique : examen, synthèse et orientations futures de la recherche. EUR. J. Inf. Système. 2022, 31, 388-409. [Référence croisée]
4. Pessach, D. ; Shmueli, E. Une revue sur l'équité dans l'apprentissage automatique. Calcul ACM. Survivre. 2022, 55, 1–44. [Référence croisée]
5. Aghaei, S. ; Azizi, MJ; Vayanos, P. Apprendre des arbres de décision optimaux et équitables pour une prise de décision non discriminatoire. Proc. AAAI Conf. Artif. Intell. 2019, 33, 1418-1426. [Référence croisée]
6. Kamiran, F. ; Calders, T. Techniques de prétraitement des données pour la classification sans discrimination. Connaître. Inf. Système. 2012, 33, 1-33. [Référence croisée]
7. Calmon, F. ; Wei, D. ; Vinzamuri, B. ; Ramamurthy, KN ; Varshney, KR Prétraitement optimisé pour la prévention de la discrimination. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, Long Beach, Californie, États-Unis, 4-9 décembre 2017.
8. Shahbazi, N. ; Lin, Y. ; Asudeh, A. ; Jagadish, HV Biais de représentation dans les données : une enquête sur les techniques d'identification et de résolution. Calcul ACM. Survivre. 2023, 55, 1–39. [Référence croisée]
9. Chen, Z. ; Zhang, JM; Sarro, F. ; Harman, M. Une étude empirique complète des méthodes d'atténuation des biais pour l'apprentissage automatique classificateurs. ACM Trans. Logiciel. Ing. Méthode. 2023, 32, 1–30. [Référence croisée]
10. Perzynski, A. ; Berg, KA; Thomas, C. ; Cemballi, A. ; Forgeron, T. ; Shick, S. ; Gunzler, D. ; Sehgal, AR Discrimination raciale et facteurs économiques dans la délimitation des quartiers de l'Ohio. Bois Rév. Soc. Sci. Rés. Course 2023, 20, 293-309. [Référence croisée]
11. Steil, JP; Albright, L. ; Rugh, JS ; Massey, DS La structure sociale de la discrimination hypothécaire. Maison. Goujon. 2018, 33, 759-776. [Référence croisée]
12. Salgado, JF; Moscoso, S. ; García-Izquierdo, AL ; Anderson, NR Façonner des lieux de travail inclusifs grâce au dialogue social ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2017.
13. Leavy, S. ; Méaney, G. ; Wade, K. ; Greene, D. Atténuer les préjugés sexistes dans les ensembles de données d'apprentissage automatique. Dans Actes des biais et aspects sociaux dans la recherche et la recommandation : premier atelier international, BIAS 2020, Lisbonne, Portugal, 14 avril 2020 ; p. 12-26.
14. Hort, M. ; Chen, Z. ; Zhang, JM; Harman, M. ; Sarro, F. Atténuation des biais pour les classificateurs d'apprentissage automatique : une enquête complète. ACM J. Informatique responsable. 2023, 1, 1-52. [Référence croisée]
15. Fahsé, T. ; Huber, V. ; van Giffen, B. Gestion des préjugés dans les projets d'apprentissage automatique. Dans L'innovation grâce aux systèmes d'information : Volume II : Une collection des dernières recherches sur les questions technologiques ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2021 ; pp. 94-109.
16. Zhang, Z. ; Neill, DB identifiant un biais prédictif important dans les classificateurs. arXiv 2017, arXiv : 1611.08292. [Référence croisée]
17. Zheng, Z. ; Cai, Y. ; Li, Y. Méthode de suréchantillonnage pour une classification déséquilibrée. Calculer. Informer. 2015, 34, 1017-1037.
18. Chawla, Nevada ; Bowyer, KW; Hall, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE : Technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques. J.Artif. Intell. Rés. 2002, 16, 321-357. [Référence croisée]
19. Lui, H. ; Bai, Y. ; Garcia, EA; Li, S. ADASYN : Approche d'échantillonnage synthétique adaptative pour l'apprentissage déséquilibré. Dans Actes de la Conférence internationale conjointe de l'IEEE 2008 sur les réseaux de neurones (Congrès mondial de l'IEEE sur l'intelligence informatique), Hong Kong, Chine, 1er-8 juin 2008 ; pages 1322 à 1328.
20. Janssen, P. ; Sadowski, BM Bias in Algorithms : Sur le compromis entre précision et équité. Dans Actes de la 23e Conférence biennale de la Société internationale des télécommunications, Göteborg, Suède, 21-23 juin 2021.
21. Hardt, M. ; Prix, E. ; Srebro, N. Égalité des chances dans l'apprentissage supervisé. Dans les actes des avancées en matière neuronale Systèmes de traitement de l'information, Barcelone, Espagne, 5-10 décembre 2016.
22. Kamishima, T. ; Akaho, S. ; Asoh, H. ; Sakuma, J. Classificateur soucieux de l'équité avec régularisateur de suppression des préjugés. Dans Actes de l'apprentissage automatique et découverte des connaissances dans les bases de données : Conférence européenne, ECML PKDD 2012, Bristol, Royaume-Uni, 24-28 septembre 2012 ; p. 35-50.
23. Calders, T. ; Žliobaitė, I. Pourquoi des processus informatiques impartiaux peuvent conduire à des procédures de décision discriminantes. Dans Discrimination et confidentialité dans la société de l'information : exploration de données et profilage dans de grandes bases de données ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2013 ; p. 23-33.
24. Burt, A. Comment lutter contre la discrimination dans l'IA. Revue de Harvard business. 2020 Disponible en ligne : https://hbr.org/2020/08/how-to-fight-discrimination-in-ai (consulté le 12 juillet 2024).
25. Siegler, A. ; Admussen, W. Découvrir la discrimination raciale par la police. Université du Nord-Ouest. Loi Rév. 2021, 115, 987-1054.
26. Grabowicz, P. ; Perello, N. ; Mishra, A. Comment former des modèles qui ne propagent pas la discrimination ? Blog Equate et Machine Learning , Université du Massachusets, Amherst. 2022. Disponible en ligne : https://groups.cs.umass.edu/equate-ml/2022/04/07/how-to-train-models-that-do-not-propagate-discrimination/ (consulté le 12 juillet 2024).
27. Khani, F. ; Liang, P. De la discrimination dans l'apprentissage automatique à la discrimination dans le droit, partie 1 : Traitement disparate. Blog du laboratoire d'IA de Stanford . 2022. Disponible en ligne : https://ai.stanford.edu/blog/discrimination_in_ML_and_law/ (consulté le 12 juillet 2024).
28. Shahriari, K. ; Shahriari, M. Examen des normes IEEE – Conception éthique : une vision pour donner la priorité au bien-être humain grâce à l'intelligence artificielle et aux systèmes autonomes. Dans les actes de la Conférence internationale sur les technologies humanitaires (IHTC) de l'IEEE Canada, Toronto, ON, Canada, 21 et 22 juillet 2017 ; pp. 197-201.

Machine Translated by Google

29. Commission européenne ; Direction générale des réseaux de communication, du contenu et de la technologie. Lignes directrices éthiques pour une IA digne de confiance. Office des publications. 2019. Disponible en ligne : https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d39885 69-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/langue-fr/format-PDF/source-337437547 (consulté le 10 juin 2024)
30. Ebers, M. ; Hoch, VRS ; Rosenkranz, F. ; Ruschemeier, H. ; Steinrötter, B. La proposition de la Commission européenne pour une loi sur l'intelligence artificielle – Une évaluation critique par les membres de la Robotics and AI Law Society (RAILS). J 2021, 4, 589-603. [Référence croisée]
31. Hajian, S. ; Domingo-Ferrer, J. Une méthodologie pour la prévention de la discrimination directe et indirecte dans l'exploration de données. IEEETrans. Connaître. Ingénierie des données. 2012, 25, 1445-1459. [Référence croisée]
32. Poisson, B. ; Kun, J. ; Lelkes, A.D. Une approche basée sur la confiance pour équilibrer l'équité et l'exactitude. Dans les actes du SIAM 2016 Conférence internationale sur l'exploration de données, Miami, FL, États-Unis, 5-7 mai 2016 ; pp. 144-152.
33. Hajian, S. Prévention simultanée de la discrimination et protection de la vie privée dans la publication et l'exploration de données. arXiv 2013, arXiv : 1306.6805. [Référence croisée]
34. Sondeck, LP; Laurent, M. ; Frey, V. La métrique du taux de discrimination sémantique pour les mesures de confidentialité qui remet en question l' avantage de la t-proximité par rapport à la l-diversité. Dans Actes de la 14e Conférence internationale sur la sécurité et la cryptographie, Madrid, Espagne, 24-26 juillet 2017 ; Volume 6, pp. 285-294.
35. Ruggieri, S. Utilisation de l'anonymat de proximité pour contrôler la non-discrimination. Trans. Données privées. 2014, 2, 99-129.
36. Romano, Y. ; Bates, S. ; Candes, E. Atteindre des chances égalisées en rééchantillonnant les attributs sensibles. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, en ligne, 6-12 décembre 2020 ; pp. 361-371.
37. Peng, K. ; Chakraborty, J. ; Menzies, T. Fairmask : Une meilleure équité grâce à un rééquilibrage basé sur un modèle des attributs protégés. IEEETrans. Logiciel. Ing. 2022, 49, 2426-2439. [Référence croisée]
38. Dhar, P. ; Gleason, J. ; Roy, A. ; Castillo, CD ; Chellappa, R. PASS : Système de suppression d'attributs protégés pour atténuer les biais dans la reconnaissance faciale. Dans Actes de la conférence internationale IEEE/CVF sur la vision par ordinateur, Montréal, QC, Canada, 10-17 octobre 2021 ; pages 15087 à 15096.
39. Krasanakis, E. ; Spyromitros-Xioufis, E. ; Papadopoulos, S. ; Kompatsiaris, Y. Repondération sensible adaptative pour atténuer les biais dans la classification soucieuse de l'équité. Dans Actes de la conférence World Wide Web, Lyon, France, 23-27 avril 2018 ; pp. 853-862.
40. Ran˘ci´c, S. ; Radovanovic, S. ; Delibaši´c, B. Enquête sur les techniques de suréchantillonnage pour des modèles d'apprentissage automatique équitables. Dans Actes des systèmes d'aide à la décision XI : Systèmes, analyses et technologies d'aide à la décision en réponse à la gestion de crise mondiale : 7e Conférence internationale sur la technologie des systèmes d'aide à la décision, ICDSST 2021, Loughborough, Royaume-Uni, 26-28 mai 2021 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2021 ; pp. 110-123.
41. Yan, S. ; te Kao, H. ; Ferrara, E. Équilibrage de classes équitable : améliorer l'équité du modèle sans observer les attributs sensibles. Dans Actes de la 29e Conférence internationale de l'ACM sur la gestion de l'information et des connaissances, événement virtuel, Irlande, 19-23 octobre 2010 ; pages 1715-1724.
42. HuZhang, B. ; Lemoine, B. ; Mitchell, M. Atténuer les préjugés indésirables grâce à l'apprentissage contradictoire. Dans Actes de la conférence AAAI/ACM sur l'IA, l'éthique et la société, Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 2 et 3 février 2018 ; pp. 335-340.
43. Célis, LE; Huang, L. ; Keswani, V. ; Vishno, NK Classification avec contraintes d'équité : un méta-algorithme avec des garanties prouvables. Dans Actes de la Conférence sur l'équité, la responsabilité et la transparence, Atlanta, GA, États-Unis, 29-31 janvier 2019 ; pp. 319-328.
44. Zafar, MB; Valera, I. ; Rodriguez, MG; Gummadi, KP L'équité au-delà d'un traitement disparate et d'un impact disparate : apprendre la classification sans maltraitance disparate. Dans Actes de la 26e Conférence internationale sur le World Wide Web, Perth, Australie, 3-7 avril 2017 ; pages 1171 à 1180.
45. Agarwal, A. ; Beygelzimer, A. ; Dudik, M. ; Langford, J. ; Wallach, H. Une approche de réduction pour une classification équitable. Dans les actes de la Conférence internationale sur l'apprentissage automatique, Stockholm, Suède, 10-15 juillet 2018 ; pp. 60-69.
46. Lowy, A. ; Baharlouei, S. ; Pavan, R. ; Razaviyayn, M. ; Beirami, A. Un cadre d'optimisation stochastique pour une minimisation équitable des risques. Trans. Mach. Apprendre. Rés. 2022. [Référence croisée]
47. Spinelli, I. ; Scardapane, S. ; Hussein, A. ; Uncini, A. Fairdrop : Abandon de bord biaisé pour améliorer l'équité dans l'apprentissage de la représentation graphique. IEEETrans. Artif. Intell. 2021, 3, 344-354. [Référence croisée]
48. Hort, M. ; Zhang, JM; Sarro, F. ; Harman, M. Fairea : Une approche de mutation comportementale modèle pour évaluer les méthodes d'atténuation des biais. Dans les actes de la 29e réunion conjointe de l'ACM sur la conférence et le symposium européens sur le génie logiciel sur les fondements du génie logiciel, Athènes, Grèce, 23-28 août 2012 ; pp. 994-1006.
49. Bhaskaruni, D. ; Hein.; Lan, C. Améliorer l'équité des prévisions via un ensemble de modèles. Dans les actes de la 31e conférence internationale de l'IEEE sur les outils dotés d'intelligence artificielle (ICTAI), Portland, OR, États-Unis, 4-6 novembre 2019 ; pages 1810-1814.
50. Iosifidis, V. ; Fétahu, B. ; Ntoutsi, E. Fae : Un cadre d'ensemble soucieux de l'équité. Dans Actes de la Conférence internationale de l'IEEE sur le Big Data (Big Data), Los Angeles, Californie, États-Unis, 9-12 décembre 2019 ; pages 1375 à 1380.
51. Dwork, C. ; Hardt, M. ; Pitassi, T. ; Reingold, O. ; Zemel, R. L'équité par la sensibilisation. Dans Actes de la 3e Innovations en Conférence sur l'informatique théorique, Cambridge, MA, États-Unis, 8-10 janvier 2012 ; pp. 214-226.
52. Pleiss, G. ; Raghavan, M. ; Wu, F. ; Kleinberg, J. ; Weinberger, KQ Sur l'équité et l'étalonnage. Dans Actes des Avances en Neural Information Processing Systems, Long Beach, Californie, États-Unis, 4-8 décembre 2017.
53. Karimi-Haghighi, M. ; Castillo, C. Améliorer un outil de prédiction de la récidive grâce à l'apprentissage automatique : efficacité et équité algorithmique. Dans Actes de la dix-huitième Conférence internationale sur l'intelligence artificielle et le droit, São Paulo, Brésil, 21-25 juin 2017 ; pp. 210-214.

Machine Translated by Google

54. Friedler, SA; Scheidegger, C. ; Venkatasubramanian, S. L'(im)possibilité de l'équité : différents systèmes de valeurs nécessitent différents mécanismes pour une prise de décision équitable. Commun. ACM 2021, 64, 136-143. [Référence croisée]
55. García, V. ; Sánchez, JS; Mollineda, RA Sur l'efficacité des méthodes de prétraitement face à différents niveaux de déséquilibre de classe. Système basé sur les connaissances. 2012, 25, 13-21. [Référence croisée]
56. Breiman, L. Arbres de classification et de régression ; Routledge : Londres, Royaume-Uni, 2017.
57. Pedregosa, F. ; Varoquaux, G. ; Gramfort, A. ; Michel, V. ; Thirion, B. ; Grisel, O. ; Blondel, M. ; Prettenhofer, P. ; Weiss, R. ; Dubourg, V. ; et coll. Scikit-learn : apprentissage automatique en Python. J. Mach. Apprendre. Rés. 2011, 12, 2825-2830.
58. Kelly, M. ; Longjohn, R. ; Nottingham, K. Le référentiel d'apprentissage automatique UCI. 2024. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu (consulté le 10 juin 2024).
59. Becker, B. ; Kohavi, R. Adulte. Référentiel d'apprentissage automatique UCI. 1996. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu/dataset/2/adulte (consulté le 10 juin 2024). [Référence croisée]
60. Hofmann, H. ; Statlog (données de crédit allemandes). Référentiel d'apprentissage automatique UCI. 1994. Disponible en ligne : https://archive.ics.uci.edu/dataset/144/statlog+allemand+crédit+data (consulté le 10 juin 2024). [Référence croisée]
61. Dressel, J. ; Farid, H. L'exactitude, l'équité et les limites de la prévision de la récidive. Sci. Av. 2018, 4, eaao5580. [Référence croisée]
62. Huang, Q. ; Mao, J. ; Liu, Y. Un algorithme de recherche de grille amélioré pour l'optimisation des paramètres SVR. Dans Actes de la 14e Conférence internationale de l'IEEE 2012 sur les technologies de communication, Chengdu, Chine, 9-11 novembre 2012 ; pp. 1022-1026.
63. Caton, S. ; Haas, C. L'équité dans l'apprentissage automatique : une enquête. Calcul ACM. Survivre. 2023, 56, 1–38. [Référence croisée]
64. Alabdulmohsin, I. ; Lucic, M. Un algorithme presque optimal pour débiaiser les modèles d'apprentissage automatique formés. Dans les actes du 35e conférence sur les systèmes de traitement de l'information neuronale, en ligne, du 6 au 14 décembre 2021.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Traitement et distribution sécurisés des données gérées en mode privé Système de fichiers interplanétaire utilisant des preuves sans connaissance

Kyohei Shibano 1,*, Kensuke Ito [1], Changhee Han [2], Tsz Tat Chu [2], Wataru Ozaki [2] et Gento Mogi [1]

[1] Département de gestion technologique pour l'innovation, École d'ingénierie, Université de Tokyo, Tokyo 113-8656, Japon Callisto Inc.,
[2] Tokyo 171-0022, Japon *
Correspondance : shibano@tmi.tu-tokyo.ac.jp

Résumé : Dans cette étude, une nouvelle méthode de partage de données est proposée qui utilise un système de fichiers interplanétaire privé – un système de stockage décentralisé exploité au sein d'un réseau fermé – pour distribuer des données à des entités externes tout en rendant leur authenticité vérifiable. Parmi les deux modes de fonctionnement de l'IPFS, public et privé, cette étude se concentre sur la méthode d'utilisation de l'IPFS privé. L'IPFS privé n'est pas ouvert au grand public ; bien qu'elle présente un risque de falsification des données lors de la distribution des données à des parties externes, la méthode proposée garantit l'authenticité des données reçues. En particulier, cette méthode applique un type de preuve à connaissance nulle, à savoir le protocole Groth16 de zk-SNARKs, pour garantir que les données correspondent à l'identifiant de contenu dans un IPFS privé. De plus, le nom du destinataire est intégré aux données distribuées pour empêcher toute distribution secondaire non autorisée. Les expériences ont confirmé l'efficacité de la méthode proposée pour une taille de données d'image allant jusqu'à 120 × 120 p
Dans les études futures, la méthode proposée sera appliquée à des types de données plus volumineux et plus diversifiés.

Mots clés : IPFS ; preuve de connaissance nulle ; Circom; zk-SNARK ; IPFS privés ; distribution de données ; traitement de l'information ; sécurité des données

check for updates

Citation : Shibano, K. ; Ito, K. ; Han, C. ; Chu, TT ; Ozaki, W. ; Mogi, G. Traitement et distribution sécurisés des données gérées sur un système de fichiers interplanétaire privé à l'aide de Zero-Knowledge Preuves. Électronique 2024, 13, 3025. https://doi.org/10.3390/électronique13153025

Rédactrice académique : Aryya Gangopadhyay

Reçu : 13 juin 2024
Révisé : 14 juillet 2024
Accepté : 20 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les systèmes décentralisés sont robustes car ils ne disposent pas d'un point de défaillance unique ; par conséquent, ils sont largement appliqués dans les secteurs d'entreprise, notamment les cryptomonnaies, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les services financiers et l'identité numérique. Pour stocker des données de grande taille telles que des images , ces systèmes nécessitent des fonctions de stockage intrinsèquement décentralisées. La blockchain, couramment utilisée conjointement, gère généralement des données de plus petite taille telles que les historiques de transactions et fonctionne comme une base de données de grand livre. L'InterPlanetary File System (IPFS) est un système de stockage décentralisé de premier plan qui stocke les données sur plusieurs nœuds pour améliorer la disponibilité des données. L'IPFS comporte deux variantes : l'IPFS public, dans lequel les données peuvent être stockées par n'importe quel utilisateur avec un accès illimité, et l'IPFS privé, dans lequel un réseau fermé accessible uniquement au sein d'organisations ou de groupes spécifiques est établi, offrant une confidentialité et une sécurité améliorées .

Lors du stockage de données dans IPFS, il est crucial de comprendre les différences entre IPFS public et IPFS privé. L'IPFS public permet à quiconque d'accéder aux données, tandis que l'IPFS privé n'est accessible qu'au sein d'organisations ou de groupes spécifiques, améliorant ainsi la confidentialité et la sécurité.
Lors du stockage d'informations sensibles, telles que des données confidentielles, dans un IPFS public, l'application d'un système de cryptage approprié est essentielle pour garantir la protection des données. En revanche, l'IPFS privé offre une plus grande sécurité pour le stockage des données, car il n'est accessible qu'au sein d'un réseau fermé.

En particulier pour les organisations telles que les entreprises ou les établissements de santé, le stockage de données dans un IPFS public, malgré l'utilisation de technologies de cryptage puissantes, comporte des risques inhérents. De plus, le risque de fuites de données dues à des erreurs opérationnelles existe de manière persistante dans de tels cas ; bien que les données soient cryptées, elles sont exposées au monde entier, ce qui les rend vulnérables aux attaques par force brute et à d'autres menaces de sécurité.

Machine Translated by Google

Concernant l'accessibilité, l'IPFS public permet aux utilisateurs généraux d'accéder et de récupérer directement données. Cependant, dans les IPFS privés, les données doivent être reçues des membres de l'organisation ou groupe constituant le réseau. Au cours de ce processus, si les données sont falsifiées, les utilisateurs peuvent alors incapable de le détecter. Par conséquent, faire confiance aux intermédiaires chargés du traitement des données le transfert devient alors obligatoire. Pour résoudre le problème de confiance susmentionné, un nouveau un procédé est proposé ici pour distribuer des données stockées dans un IPFS privé à des entités externes tout en rendant son authenticité vérifiable. Le protocole Groth16 [1] des zk-SNARK, un type de ZKP, est appliqué aux données stockées dans un IPFS privé pour garantir l'authenticité des données. De plus, les informations du destinataire sont intégrées dans les données distribuées pour empêcher distribution secondaire non autorisée. La méthode proposée de partage de données est importante car il est adapté au cas IPFS privé.

Les différences sur plusieurs aspects, notamment la sécurité et l'accessibilité, lors du stockage les données dans l'IPFS public et l'IPFS privé au sein du domaine de l'entreprise sont résumées dans Tableau 1. Cette étude propose des solutions aux menaces associées aux IPFS privés.

Tableau 1. Comparaison entre IPFS publics et privés dans le domaine de l'entreprise.

	IPFS publics	IPFS privé
Modèle de confiance	Sans confiance	Nécessite une confiance dans le groupe opérationnel
Restrictions d'accès	Accessible à tous	Accessible uniquement au sein du groupe opérationnel
Risque de fuite de données	Risque constant de fuite dû à une erreur de l'utilisateur	Faible risque de fuite au sein d'un réseau fermé
Traitement des informations confidentielles Information	Nécessite un cryptage approprié	Les données stockées dans IPFS ne nécessitent pas de cryptage de haut niveau ; il y a un point de confiance lors de la transmission de données aux utilisateurs
Risque d'attaque par force brute toujours présent		Faible
Méthode de récupération des données	Accès direct par les utilisateurs	Données reçues des membres de l'organisation ou du groupe
Des menaces	Nécessite un cryptage qui empêche le décryptage par des utilisateurs non autorisés	Il existe un risque de falsification lors du transfert de données aux utilisateurs.

Le reste de cet article est organisé comme suit. La section 2 présente les précédents recherche. La section 3 décrit les technologies fondamentales, à savoir ZKP et zk-SNARK. La section 4 décrit la structure de la méthode proposée, tandis que la section 5 décrit les applications potentielles de cette méthode. La section 6 présente la mise en œuvre de cette méthode, tandis que la section 7 discute des expériences réalisées pour vérifier l'efficacité du mise en œuvre. La section 8 présente une discussion des résultats expérimentaux, tandis que la section 9 présente les conclusions du document et un aperçu des défis futurs.

2. Études connexes

Les systèmes décentralisés existants utilisent IPFS, notamment en combinaison avec la blockchain technologie. Kumar et coll. [2] ont proposé une méthode de gestion sécurisée des données médicales en intégrer IPFS à une blockchain. Azbeg et coll. [3] ont spécifiquement suggéré un système qui données médicales gérées et stockées à l'aide d'IPFS privés et d'une blockchain autorisée par utiliser le recryptage par proxy pour garantir un décryptage sécurisé par des médecins désignés. Lorsqu'un Le médecin reçoit certaines données d'un patient, il obtient les données recryptées via un hôpital. Hossan et coll. [4] ont également proposé un système pour enregistrer en toute sécurité les informations pour le covoiturage services utilisant IPFS et une blockchain privée.

En se concentrant sur le contrôle de la distribution des données gérées par IPFS, Lin et al. [5] a proposé un système de protection des données privées utilisant un IPFS amélioré combiné à un blockchain. Ce système a enregistré les métadonnées des fichiers et accédé aux autorisations sur la blockchain, permettant aux utilisateurs de contrôler le partage de fichiers. De plus, le système a mis en œuvre des fonctionnalités de gestion efficaces à l'aide de contrats intelligents, améliorant ainsi la sécurité et la gestion des données.

Machine Translated by Google

la flexibilité. Battah et coll. [6] ont développé un système utilisant l'authentification multipartite (MPA), le rechiffrement par proxy et les contrats intelligents sur une blockchain pour le contrôle d'accès décentralisé aux données cryptées stockées dans IPFS. Huang et coll. [7] ont introduit un proxy IPFS de confiance pour réaliser le contrôle d'accès et la gestion des clés de groupe pour les données cryptées stockées dans IPFS. Sun et coll. [8] ont proposé un système qui permettait uniquement aux individus possédant les attributs appropriés de déchiffrer les données cryptées stockées dans IPFS à l'aide d'un système de cryptage basé sur les attributs de politique de texte chiffré, facilitant ainsi une gestion efficace des informations médicales. Kang et coll. [9] ont permis la distribution de données gérées à l'aide d'un IPFS privé et d'une blockchain privée à des utilisateurs externes utilisant un réseau de données nommé (NDN). De plus, Uddin et al. [10] ont proposé un système de partage de fichiers utilisant la technologie IPFS et d'infrastructure à clé publique (PKI) sans nécessiter un tiers de confiance.

Plusieurs études ont utilisé ZKP pour la distribution de données. Par exemple, Li et al. [11] ont proposé un système de gestion du trafic préservant la confidentialité qui combinait des preuves non interactives de portée de connaissance nulle avec une blockchain. Un prototype utilisant Hyperledger Fabric et Hyperledger Ursa répondait aux exigences de confidentialité des données pour la gestion du trafic en temp

Cette étude propose une méthode pour traiter et distribuer de manière appropriée les données gérées au sein d'IPFS privés aux utilisateurs extérieurs au réseau, offrant ainsi une approche différente de celles proposées dans les études précédentes. Certaines études ont adopté le recryptage proxy comme méthode appropriée pour le stockage et la distribution de données dans IPFS [3,6]. Grâce à cette méthode, les données distribuées peuvent être rechiffrées pour être déchiffrées avec la clé privée du destinataire. De plus, lors du stockage de données dans IPFS, l'enregistrement de la valeur de hachage des données pré-chiffrées sur la blockchain permet aux destinataires de vérifier l'exactitude de leurs données reçues après décryptage. Cependant, cette méthode ne peut pas gérer les cas dans lesquels des données sont traitées, comme l'intégration du nom du destinataire dans les données décryptées, comme dans cette étude.

3. Zero-Knowledge Proof ZKP

est un protocole cryptographique qui permet à un prouveur de prouver la validité d'une proposition à un vérificateur sans divulguer aucune information supplémentaire autre que la validité de la proposition. La proposition de cette étude est que les données fournies à une entité externe sont générées sur la base d'un CID donné. Notre objectif est de permettre à un membre d'IPFS privé (preuve) de prouver cette proposition à une entité externe (vérificateur en tant que destinataire des données) sans divulguer aucune autre information importante (telle que les droits d'accès IPFS et les clés de cryptage).

ZKP, en particulier le protocole Groth16 des zk-SNARK utilisé dans cette étude, commence par une configuration fiable dans laquelle les deux parties établissent des paramètres publics cruciaux pour la génération et la vérification sécurisées des preuves. Dans le schéma ZKP, nous générons d'abord un circuit qui décrit le processus pour lequel une preuve est destinée. Le circuit comprend les conditions à vérifier comme l'existence d'un CID. Grâce au système ZKP, des clés cryptographiques, en particulier une clé de preuve et une clé de vérification, sont créées. Ces clés sont cruciales pour créer une preuve du circuit et sa vérification. À l'aide de la clé de preuve et des données d'entrée, le prouveur génère une preuve qui révèle la validité des données de sortie par rapport aux conditions spécifiées dans le circuit. Le vérificateur utilise ensuite la clé de vérification pour vérifier la preuve et les données de sortie. Si la preuve est valide, cela confirme l'intégrité des données sans exposer aucune information sous-jacente.

Dans cette étude, le traitement Groth16 est effectué à l'aide de circom [12,13] et snarkjs [14]. Le flux du processus est résumé dans la figure 1.

zk-SNARKs est utilisé en raison de sa nature non interactive et de son efficacité, qui sont particulièrement avantageuses pour les systèmes utilisant des contrats intelligents en raison des faibles coûts de calcul pour vérifier la preuve. De plus, zk-SNARKs est connu pour ses exigences de calcul élevées et la nécessité de spécifications PC avancées. Par exemple, dans l'une des applications représentatives de zk-SNARK, Zcash [15], le processus de génération de preuve prend plus d'une demi-minute pour une seule transaction anonyme [16].

Machine Translated by Google

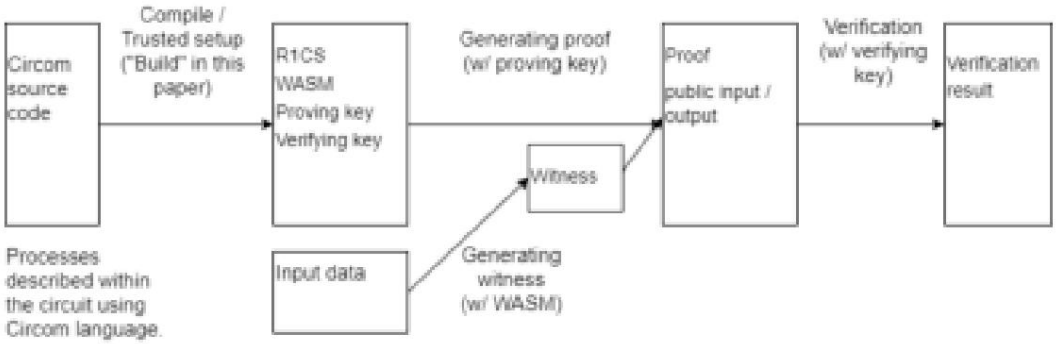


Figure 1. Preuve de connaissance nulle utilisant Circom.

4. Système proposé

La figure 2 présente un aperçu du système proposé.

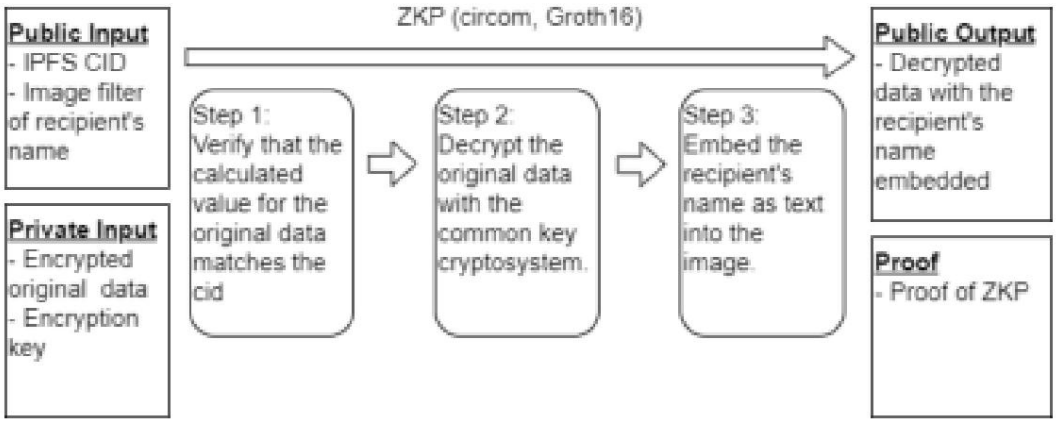


Figure 2. Flux de processus de ZKP : un exemple de traitement de données d'image.

Ici, nous faisons les hypothèses suivantes : • L'IPFS privé est géré par un nombre limité de membres. • Les données sont stockées dans IPFS dans un format crypté à l'aide d'une cryptographie à clé symétrique. • La clé de cryptage est exclusivement détenue par une personne physique parmi les membres, c'est-à-dire un administrateur.

Le système proposé facilite la création d'une preuve ZKP à travers le circuit par le membre détenteur de la clé de chiffrement (équivalent à un administrateur). Les entrées et sorties (autres que les preuves) de ce processus sont les suivantes : • Entrée publique : – CID des données chiffrées originales ; – Un filtre pour intégrer le nom du destinataire dans les données ; • Entrée privée : – Données originales cryptées ; - Clé de cryptage; • Sortir:

– Données décryptées avec le nom du destinataire intégré.

Notez que l'implémentation optimisée pour ZK (Section 6.1) ajoute plus d'informations à la contribution du public. En particulier, le processus interne de ZKP implique les étapes suivantes : 1. Calculer le CID des données chiffrées d'origine pour vérifier une correspondance avec le code d CID enregistré.

Machine Translated by Google

2. Décryptage des données originales à l'aide d'une cryptographie à clé symétrique.
3. Intégration du nom du destinataire dans les données brutes de l'image décryptée en fonction du filtre fournies dans la contribution du public.

Dans le système proposé, nous ne nous concentrons pas uniquement sur les données d'image, mais les utilisons comme exemples de données pour vérifier l'applicabilité du schéma proposé. Les filtres sont utilisés pour améliorer l'efficacité du traitement à l'intérieur du circuit. Comme l'intégration des données de nom à l'intérieur du circuit nécessite des calculs intensifs, une partie considérable du traitement de l'image est effectuée à l'avance à l'extérieur du circuit et un filtre est créé. À l'aide d'une entrée et d'une preuve publiques, le destinataire peut vérifier que les données déchiffrées (c'est-à-dire la sortie) avec leur nom intégré sont générées à partir des données originales (contenues dans l'entrée privée) gérées avec le CID. Le destinataire peut vérifier auprès d'au moins un membre du réseau pour confirmer l'existence du CID dans l'IPFS privé.

En résumé, le processus susmentionné permet au destinataire de vérifier le reçu données en effectuant les tâches suivantes :

- vérifier que les données reçues ont été générées à partir des données gérées avec le CID de IPFS privé,
- confirmer à l'aide de la preuve que l'ensemble du processus a été correctement réalisé sans connaître directement les données chiffrées ou la clé de chiffrement, et • vérifier que le CID existe spécifiquement au sein de l'IPFS privé en interrogeant au moins un membre du réseau.

La nouveauté du système proposé est qu'il permet de vérifier l'authenticité des données en faisant confiance à au moins un membre du réseau même si le destinataire ne contrôle pas la clé de cryptage. (Il est naturel que le destinataire fasse confiance à au moins un membre d'un système multimembre particulier. Si aucun des membres ne peut faire confiance, il y aura alors une incitation marginale à recevoir des données gérées par ce réseau).

5. Applications potentielles Dans

l'industrie médicale, les données de diagnostic des patients sont gérées dans plusieurs établissements médicaux. Grâce au système proposé, les patients peuvent vérifier si les données qu'ils reçoivent sont effectivement gérées dans un IPFS privé pour garantir leur authenticité. Une plateforme tout-en-un est également proposée ici pour la recherche et le développement de l'apprentissage automatique avec des images médicales [17]. Sur cette plateforme, les images médicales anonymisées sont gérées dans des IPFS privés exploités par un groupe d'institutions médicales. Le système permet aux chercheurs en apprentissage automatique, externes au réseau, de vérifier si les données d'image sont effectivement gérées dans l'IPFS privé. De plus, en intégrant les informations sur les chercheurs en apprentissage automatique dans les données d'images, les établissements médicaux peuvent atténuer le risque de distribution secondaire.

Si l'application ne se limite pas à l'intégration du nom du destinataire, les applications potentielles du système proposé peuvent être encore étendues. Par exemple, considérons un scénario dans lequel une entreprise spécifique établit un IPFS privé pour partager des documents confidentiels entre les sociétés de son groupe. Si les données des salariés sont incluses, alors dissimuler les données privées et les diffuser à des entités externes permet à ces entités de confirmer l' association des salariés avec l'entreprise tout en garantissant la protection de leur vie privée. De plus, supposons qu'une université ait mis en place un IPFS privé pour permettre uniquement au personnel académique d'accéder aux données sur les performances des étudiants. Dans ce cas, les étudiants peuvent vérifier que leurs données de performances reçues sont véritablement gérées dans l'IPFS privé.

Ainsi, le système proposé prend en charge un cas hybride : distribuer des données internes à entités externes spécifiques si nécessaire – répandues dans les contextes du monde réel.

6. Implémentation Le

système proposé a été implémenté pour traiter les données d'image à l'aide de circom, un outil renommé spécialisé dans la construction de circuits zk-SNARKs. Circom permet la description des processus informatiques au sein d'un circuit en utilisant son langage unique, et le

Machine Translated by Google

Le fichier exécutable généré après compilation peut être invoqué via la bibliothèque JavaScript, snarkjs. Cet agencement permet de décrire les processus de circuit dans circom, et les tests de traitement externe et d'exactitude des circuits sont effectués à l'aide de JavaScript. Pour les zk-SNARK schéma, Groth16 a été utilisé ; il est connu pour sa vitesse d'exécution relativement plus rapide que les autres Schéma zk-SNARKs.

En particulier, nous avons travaillé sur deux types d'implémentations pour les données d'images : un standard une implémentation utilisant des techniques cryptographiques générales et une implémentation optimisée pour ZK utilisant des techniques cryptographiques compatibles avec ZK pour réduire le temps de calcul du circuit. Ces implémentations ont été utilisées pour comparer les temps de calcul requis. Les circuits ZKP nécessitent un temps de calcul considérablement important, même pour les calculs qui peuvent être facilement géré par un logiciel informatique (cela est particulièrement visible lorsqu'il s'agit de données d'images). L'efficacité informatique est donc cruciale pour une utilisation pratique.

6.1. Implémentation standard

La section 4 décrit l'entrée des données dans le circuit. Pour simplifier le circuit traitement, les données cryptées d'origine ont été formatées en tant que données d'image bitmap conformes aux normes OS/2. Les 54 premiers octets des données d'image stockent des informations telles que le largeur, hauteur et profondeur de couleur des images [18]. La profondeur de couleur est de 8 bits et chaque couleur Le composant en RVB se voit attribuer un octet, ce qui donne une représentation de 3 octets par pixel.

Dans un premier temps, le système vérifie si les données cryptées, saisies en tant qu'entrée privée, correspond au CID fourni en tant qu'entrée publique. S'ils ne correspondent pas, le système signifie une erreur et les données d'image émises en sortie sont une séquence d'octets où toutes les valeurs sont 0x00. CID sert de mécanisme crucial pour identifier les fichiers de manière unique et efficace récupérer des données depuis IPFS. CID a deux versions : V0 et V1 [19]. Ici, le plus flexible la version CID V1 a été utilisée. CID inclut un hachage des données respectives, garantissant différentes les données auront des CID différents. Généralement, le CID V1 est calculé à l'aide du hachage SHA256. fonction, et l'implémentation standard utilise SHA256 pour calculer le CID.

La structure des données du CID V1 est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2. Structure de données CID V1.

Position de l'octet	Description	Valeur dans la mise en œuvre
Premier octet	Préfixe multibase	0x01
Deuxième octet	de la version CID	0x55 : données brutes
Troisième octet	Identifiant de la fonction de hachage	0x12 : SHA-256
Quatrième octet	Longueur de hachage	0x20 : 32 octets
À partir du cinquième octet	Valeur de hachage	Valeur de hachage SHA-256 (32 octets)

Le codage du CID est effectué en Base32. Base32 code une séquence d'octets construit sur la base de cette structure pour générer CID.

À l'intérieur du circuit, la valeur CID saisie est décodée de Base32 et du système vérifie si la valeur de hachage extraite correspond au hachage SHA256 calculé à partir du données cryptées.

Par la suite, les données cryptées sont décryptées. AES-CTR est utilisé comme cryptage algorithme, qui est un type de cryptographie à clé symétrique. Le cryptage AES-CTR et le décryptage dans circcom-chacha20 [20] a été utilisé. Pour décrypter le cryptage AES-CTR, la clé de chiffrement et le nom occasionnel utilisé lors du chiffrement sont requis. Ils sont entrés dans le circuit sous forme de clé de 256 bits et de nom occasionnel de 128 bits, respectivement, en tant qu'entrées privées. De plus, AES-CTR gère des volumes de données par multiples de 16. Par conséquent, si la longueur de l'image les données avant le cryptage ne sont pas un multiple de 16, des zéros (0x00) sont ajoutés à la fin des données pour l'aligner sur cette exigence.

Enfin, un filtre est appliqué aux données décryptées pour intégrer le nom du destinataire. Implémenter l'intégration de texte directement dans le circuit peut augmenter considérablement la charge de calcul ; par conséquent, un filtre est créé à l'extérieur du circuit qui effectue un travail considérable

Machine Translated by Google

partie du traitement de l'image à l'avance. La police utilisée pour le texte représentant le nom du destinataire est la police Misaki [21]. Le filtre est ensuite utilisé pour rationaliser le traitement à l'intérieur du circuit. Le filtre est une liste de nombres où les valeurs de 0 à 255 sont utilisées pour changer la couleur de chaque pixel au cas où il diffère de celle des pixels de l'image originale ; de plus, une valeur de 300 indique que la couleur doit rester telle que dans l'image originale. Ce filtre représente la position sur l'image où le nom du destinataire doit être inséré.

À l'intérieur du circuit, les couleurs des pixels spécifiées dans les données BMP décryptées sont modifiées en fonction de ce filtre.

6.2. Implémentation optimisée par ZK

L'implémentation optimisée pour ZK modifie la fonction de hachage, la technologie de cryptage et le traitement en circuit vers l'implémentation de cryptage standard compatible avec ZK. Cette implémentation améliore l'efficacité du calcul et n'évalue pas la différence de vitesses de calcul entre le chiffrement compatible ZK et le chiffrement général. Par conséquent, le traitement en circuit a également été modifié.

Le hachage Poséidon [22] a été utilisé comme fonction de hachage pour calculer le CID. Notamment, l'utilisation du hachage Poséidon pour les CID n'est pas officiellement prise en charge ; par conséquent, il a été développé spécifiquement pour cette étude. Bien que SHA256 soit couramment utilisé dans les calculs généraux, il nécessite un temps de calcul considérable au sein des circuits ZKP. Le hachage Poséidon est implémenté dans circcom et JavaScript (circomlib [23] et circcomlibjs [24], respectivement). Il est calculé sur un corps fini avec un ordre premier et peut accepter jusqu'à 16 variables d'entr L'ordre utilisé est inférieur au maximum de 32 octets mais supérieur au maximum de 31 octets. Cela indique que chacune des 16 entrées doit contenir des données ne dépassant pas cet ordre. Dans cette implémentation, les données ciblées pour le calcul de hachage sont divisées en segments de 31 octets comme valeurs d'entrée. Si la division dépasse 16 segments, le hachage Poséidon est calculé pour les 16 premiers segments. Ce résultat est ajouté aux 15 segments de données suivants pour une entrée de hachage Poséidon ultérieure. Le processus est répété jusqu'à ce que toutes les données d'entrée soient utilisées pour le calcul du hachage. Sur le plan informatique, si l'entrée finale ne complète pas 16 segments, les entrées manquantes sont mises à zéro pour garantir que le calcul implique toujours 16 entrées.

Lors de la génération du CID à partir de la valeur de hachage Poséidon, la séquence d'octets doit suivre la structure de données CID V1 et être codée en Base32. Cependant, pour réduire davantage le temps de calcul, cette implémentation omet le codage Base32 et utilise directement la valeur de hachage Poséidon comme substitut au CID. La division des données d'entrée en 16 segments au sein du circuit nécessite beaucoup de calculs ; par conséquent, cette division est effectuée en dehors du circuit et donnée en entrée. Dans ce cas, la séquence d'octets de données cryptées et la liste de valeurs pour calculer le hachage Poséidon sont fournies en tant qu'entrées publiques, permettant de vérifier que les deux ensembles de données représentent les mêmes informations. Les destinataires peuvent confirmer que les données calculées pour le hachage Poséidon et les données décryptées dans le circuit sont identiques en convertissant et en vérifiant mutuellement ces deux valeurs. Dans ce cas, étant donné que les utilisateurs peuvent obtenir les données décryptées, il existe un problème de fuite de mot de passe via des attaques par force brute ou d'autres moyens.

Pour la technologie de cryptage, nous avons adopté le cryptage Poséidon [25] au lieu du cryptage AES- CTR. Le chiffrement Poséidon, implémenté dans Circom et TypeScript (poseidon- cryptage-circcom2 [26]), implique de recevoir la clé publique du destinataire, de générer une clé commune et d'assurer un chiffrement et un déchiffrement sécurisés par les deux parties. Dans ce cas cependant, une clé commune est directement générée et utilisée pour le chiffrement et le déchiffrement. Le circuit est doté de deux valeurs représentant les coordonnées d'une courbe elliptique et d'une valeur occasionnelle comme entrées privées pour le chiffrement. De plus, le filtre est implémenté de la même manière que dans l'implémentation standard.

7. Évaluation

Nous avons créé un exemple de programme basé sur les implémentations susmentionnées qui utilise circom pour décrire le circuit et utilise snarkjs pour exécuter le circuit et vérifier

Machine Translated by Google

preuves. Comme bibliothèques cryptographiques, circom-chacha20 [20], circcomlib [23], circcomlibjs [24], et poseidon-encryption-circom2 [26] ont été utilisés.

Les implémentations standard et optimisées pour ZK ont été implémentées pour chaque circuit, et leurs temps de calcul ont été comparés lors de l'exécution. Images bitmap blanches étaient les images cibles, et les expériences ont été menées en utilisant la lettre « A » comme caractère incorporé. Comme l'intégration d'un nombre quelconque de caractères ne modifie pas le traitement par le filtre, intégrant un seul caractère permettant de comparer les temps de calcul. De plus, nous avons fait varier la taille des images pour mesurer les temps d'exécution de chaque circuit. Les tailles utilisées étaient 10 × 10, 15 × 15, 30 × 15, 30 × 30, 60 × 30, 60 × 60, 120 × 60, 120 × 120, et 180 × 120 pixels. L'environnement d'exécution était Windows 11 avec un Ryzen 9 3950X CPU et 128 Go de RAM fonctionnant sous Ubuntu 22.04 dans un environnement WSL2.

La figure 3 montre un exemple d'image générée par le circuit, spécifiquement pour le pixel 60 × 30. taille en utilisant l'implémentation optimisée pour ZK. Les résultats pour chaque taille d'image sont présentés dans le tableau 3, où les contraintes non linéaires indiquent le nombre de contraintes non linéaires dans le circuit, le temps de construction est le temps nécessaire pour compiler circom et produire le circuit, et la preuve Le temps de génération est le temps nécessaire pour générer des preuves à l'aide du circuit. Comme l'implémentation standard utilise le cryptage AES-CTR, les données avec 0x00 sont ajoutées à la fin pour garantir que le la taille d'entrée est un multiple de 16.

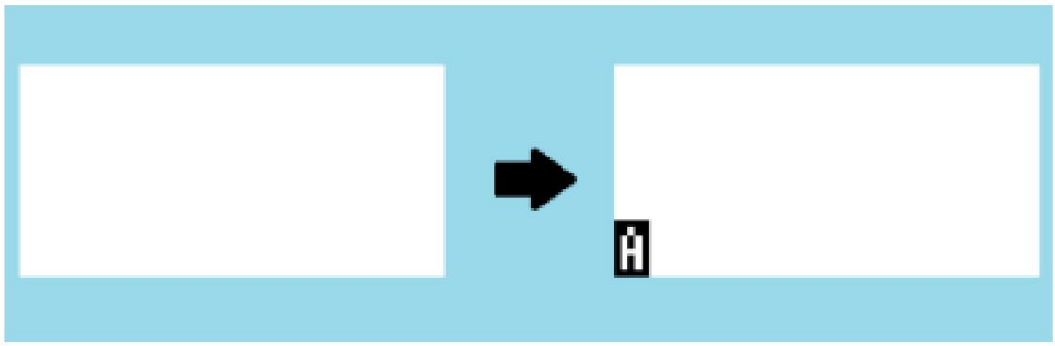


Figure 3. Une image générée par le circuit pour une taille d'image de 60 × 30 par une implémentation optimisée par ZK.

Tableau 3. Comparaison du temps d'exécution du circuit.

	Pixels	Taille de l'image [Octet]	Non linéaire Contraintes	Temps de construction [MS]	Génération de preuve Temps [ms]
Standard					
	10 × 10	384	558 341 1	668 220 1	14 377
	15 × 15	784	095 292 1	316 666 1	25 545
	30 × 15	1440	980 688 3	696 370 3	35 161
	30 × 30	2816	867 989 7	657 578 7	65 785
	60 × 30	5456	453 300	864 583	126 262
Optimisé pour ZK					
	10 × 10	376	35 407	128 979	3076
	15 × 15	775	72 725	173 210	4032
	30 × 15	1 435	134 663	275 630	5900
	30 × 30	2 815	263 450	470 872	9733
	60 × 30	5 455	509 375 1	850 612 1	17 571
	60 × 60	10 855	013 483 4	257 418 6	29 044
	120 × 120	43 255	036 913	754 928	96 580

Dans les implémentations standard et optimisées pour ZK pour 60 × 60 pixels et 180 × 120 pixels tailles d'image, le système a manqué de mémoire et le calcul n'a pas pu être terminé. Dans l'implémentation optimisée pour ZK, le nombre de contraintes non linéaires a été réduit à environ un dixième de celui de l'implémentation standard pour la même taille d'image.

Machine Translated by Google

Cela a réduit les temps de génération de build et de preuve. Cependant, la taille d'image maximale gérable n'atteignait toujours que 120 × 120 pixels, ce qui est considérablement petit pour des applications pratiques.

8. Discussion

Bien que des technologies cryptographiques compatibles ZK aient été utilisées et que les processus en circuit aient été optimisés lors de la mise en œuvre optimisée par ZK, la taille d'image maximale gérable était d'environ 120 × 120 pixels. Cela limite l'utilité pratique à des tailles d'image considérablement petites. Cependant, des recherches visant à améliorer les performances des ZKP sont en cours et les futurs progrès technologiques pourraient permettre de gérer des images de plus grande taille.

Par exemple, Zhang et al. [27] ont obtenu une accélération décuplée des zk-SNARK en utilisant les ASIC. Ma et coll. [16] ont également utilisé des unités de traitement graphique pour accélérer le temps de génération des preuves, atteignant des performances jusqu'à 48,1 fois plus rapides par rapport aux méthodes traditionnelles.

De plus, des méthodes pour simplifier les processus de calcul ont été proposées, comme la méthode du « pliage ». Cette méthode compresse les propositions à prouver [28]. À mesure que les améliorations de vitesse sont progressivement étudiées, la consommation de mémoire sera également probablement optimisée. Cela permettra potentiellement de gérer des tailles d'image plus grandes à l'avenir.

De plus, nous avons constaté que notre méthode de proposition peut gérer des tailles de données d'environ 10 Ko. Bien qu'il soit difficile d'appliquer directement notre proposition à des données d'images réalistes (allant de plusieurs Mo à des dizaines de Mo), diviser les données en morceaux en modifiant le cryptage et les chaînes intégrées pourrait rendre l'application réalisable.

De plus, nos implémentations nécessitent une valeur basée sur la taille des données originales à traiter (chiffrées) comme argument lors de la génération du circuit. Par conséquent, un circuit doit être généré pour chaque donnée. Le temps de génération du circuit (temps de construction) augmente considérablement avec la taille des données d'image ; par exemple, même dans une implémentation optimisée pour ZK, la génération d'un circuit pour une taille d'image de 120 × 120 nécessite plus de 112 minutes (6 7 Cependant, une fois le circuit généré, le temps de génération de la preuve dans les mêmes conditions est court, environ 97 s (96 580 ms). En d'autres termes, une fois qu'un circuit est généré, la génération de preuves ne prend pas beaucoup de temps. Ce fait ne pose aucun problème pratique dans les cas où la même image est distribuée à plusieurs personnes.

Dans les implémentations compatibles ZK, les données cryptées sont entrées en tant qu'entrée publique. La gestion des clés de chiffrement des images nécessite une attention particulière. Les données gérées dans IPFS privés sont cryptées. Cependant, si les clés de chiffrement sont divulguées, les données chiffrées pourraient être déchiffrées. Par conséquent, des utilisateurs spécifiques gérant des IPFS privés devraient devenir administrateurs pour gérer soigneusement les clés, ou une blockchain de type consortium pourrait être établie sur le même réseau pour définir et gérer les droits d'accès de manière appropriée.

9. Conclusions

Une nouvelle méthode a été proposée ici pour distribuer les données stockées dans un IPFS privé à des entités externes tout en rendant leur authenticité vérifiable. La méthode a appliqué un type de ZKP, zk- SNARKs, pour vérifier le CID des données et intégrer le nom du destinataire. Cette approche permet à des entités externes de vérifier que les données reçues sont générées à partir des données originales dans un IPFS privé sans nécessiter de détails tels que les droits d'accès IPFS et les clés de chiffrement.

Une implémentation standard utilisant des techniques cryptographiques conventionnelles et une implémentation optimisée pour ZK utilisant des schémas cryptographiques compatibles avec ZK ont été mises en œuvre pour améliorer l'efficacité informatique de la méthode proposée. Des expériences avec un exemple de programme ont confirmé l'efficacité de la méthode proposée pour une taille de données d'image allant jusqu'à 120 × 120 pixels.

Cette méthode proposée étend la gamme utilisable de systèmes de stockage décentralisés à un cas hybride, en distribuant les données internes à des entités externes spécifiques si nécessaire. Cette étude ouvre une nouvelle voie pour partager des informations sensibles entre différents secteurs au sein et à l'extérieur d'un groupe. Cependant, pour que la méthode proposée soit largement applicable à des types de données plus volumineux et plus diversifiés, tels que les images et les vidéos, la vitesse de traitement doit

Machine Translated by Google

être amélioré et des méthodes de fractionnement des données doivent être utilisées, ce qui entre dans le cadre de nos futures études.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, KS, CH, TTC et WO ; rédaction – préparation d'une ébauche originale , KS ; rédaction – révision et édition, KS et KI ; supervision, directeur général; administration du projet, KS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet de recherche collaboratif entre l'Université de Tokyo et Callisto Inc., financé par Callisto Inc. Ce travail a été soutenu par la Chaire dotée pour l'innovation Blockchain et le Centre Mohammed bin Salman pour les sciences et technologies futures d' Arabie Saoudite. -Japan Vision 2030 (MbSC2030) à l'Université de Tokyo.

Déclaration de disponibilité des données : le code source utilisé pour les simulations est disponible sur GitHub. https://github.com/blockchaininnovation/cicom_image_processing (consulté le 21 mars 2024).

Conflits d'intérêts : les auteurs Changhee Han, Tsz Tat Chu et Wataru Ozaki étaient employés par la société Callisto Inc. Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel. .

Les références

1. Groth, J. Sur la taille des arguments non interactifs basés sur l'appariement. Dans Proceedings of the Advances in Cryptology–EUROCRYPT 2016 : 35e Conférence internationale annuelle sur la théorie et les applications des techniques cryptographiques, Vienne, Autriche, 8-12 mai 2016 ; Actes, partie II 35 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016 ; pp. 305-326.
2. Kumar, S. ; Bharti, AK ; Amin, R. Stockage sécurisé décentralisé des dossiers médicaux à l'aide de Blockchain et IPFS : une comparaison analyse avec des orientations futures. Sécurisé. Priv. 2021, 4, e162. [Référence croisée]
3. Azbeg, K. ; Ouchetto, O. ; Andaloussi, SJ BlockMedCare : Un système de santé basé sur l'IoT, la Blockchain et l'IPFS pour les données sécurité de la gestion. Egypte. Informer. J. 2022, 23, 329-343. [Référence croisée]
4. Hossan, MS ; Khatun, ML; Rahman, S. ; Reno, S. ; Ahmed, M. Sécurisation du service de covoiturage à l'aide d'IPFS et d'hyperledger basé sur une blockchain privée. Dans les actes de la 24e Conférence internationale sur l'informatique et les technologies de l'information (ICCIT) 2021, Dhaka, Bangladesh, 18-20 décembre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 6.
5. Lin, Y. ; Zhang, C. Une méthode de protection des données privées dans IPFS. Dans les actes de la 24e conférence internationale de l'IEEE 2021 sur le travail coopératif en conception assisté par ordinateur (CSCWD), Dalian, Chine, 5-7 mai 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; pp. 404-409.
6. Battah, AA; Madine, MM; Alzaabi, H. ; Yaqoob, moi.; Salah, K. ; Jayaraman, R. Autorisation multipartite basée sur la blockchain pour accéder aux données cryptées IPFS. Accès IEEE 2020, 8, 196813-196825. [Référence croisée]
7. Huang, HS; Chang, TS; Wu, JY Un système de partage de fichiers sécurisé basé sur IPFS et blockchain. Dans les actes de la 2e Conférence internationale sur les communications électroniques, Singapour, 8-10 juillet 2020 ; pp. 96-100.
8. Soleil, J. ; Yao, X. ; Wang, S. ; Wu, Y. Système de stockage et d'accès sécurisé basé sur la blockchain pour les dossiers médicaux électroniques dans IPFS. Accès IEEE 2020, 8, 59389-59401. [Référence croisée]
9. Kang, P. ; Yang, W. ; Zheng, J. Méthode de partage de stockage de fichiers privés Blockchain basée sur IPFS. Capteurs 2022, 22, 5100. [CrossRef] [Pub Med]
10. Uddin, Minnesota ; Hasnat, AHMA; Nasrin, S. ; Alam, MS ; Yousuf, MA Système de partage de fichiers sécurisé utilisant les technologies blockchain, ipfs et pki. Dans Actes de la 5e Conférence internationale 2021 sur les technologies électriques de l'information et de la communication (EICT), Khulna, Bangladesh, 17-19 décembre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 5.
11. Li, W. ; Guo, H. ; Néjad, M. ; Shen, CC Gestion du trafic préservant la confidentialité : une approche inspirée de la blockchain et de la preuve de connaissance nulle. Accès IEEE 2020, 8, 181733-181743. [Référence croisée]
12. Bellés-Muñoz, M. ; Isabelle, M. ; Muñoz-Tapia, JL; Rubio, A. ; Baylina, J. Circom : Un langage de description de circuit pour la construction applications sans connaissance. IEEETrans. Sécurité fiable. Calculer. 2022, 20, 4733-4751. [Référence croisée]
13. Site officiel de Circom. Disponible en ligne : https://iden3.io/cicom (consulté le 24 mars 2024).
14. Dépôt Snarkjs Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/snarkjs (consulté le 4 juin 2024).
15. ZCash. Disponible en ligne : https://z.cash/ (consulté le 12 juillet 2024).
16. Ma, W. ; Xiong, Q. ; Shi, X. ; Maman, X. ; Jin, H. ; Kuang, H. ; Gao, M. ; Zhang, Y. ; Shen, H. ; Hu, W. Gzkp : Un système de preuve zéro connaissance accéléré par GPU. Dans Actes de la 28e Conférence internationale ACM sur le support architectural pour les langages de programmation et les systèmes d'exploitation, volume 2, Vancouver BC Canada, 25-29 mars 2023 ; pp. 340-353.
17. Han, C. ; Shibano, K. ; Ozaki, W. ; Osaki, K. ; Haraguchi, T. ; Hirahara, D. ; Kimura, S. ; Kobayashi, Y. ; Mogi, G. Plateforme tout-en-un pour la R&D en IA en imagerie médicale, englobant la collecte, la sélection, l'annotation et le prétraitement des données. Dans Actes de l' imagerie médicale 2024 : imagerie informatique pour les soins de santé, la recherche et les applications, San Diego, Californie, États-Unis, 18-23 février 2024 ; SPIE : Bellingham, WA, États-Unis, 2024 ; Volume 12931, pages 311 à 315.
18. Miano, J. Formats de fichiers d'images compressés : Jpeg, png, gif, xbm, bmp ; Addison-Wesley Professionnel : Boston, MA, États-Unis, 1999.

Machine Translated by Google

19. Identifiants de contenu (CID). Disponible en ligne : https://docs.ipfs.tech/concepts/content-addressing/#cids-are-not-file-hashes (consulté le 24 mars 2024). 20. Circom-chacha20 Dépôt Github. Disponible en ligne : https://github.com/reclaimprotocol/cicom-chacha20 (consulté le 24 mars 2024).
21. La police japonaise 8 × 8 points « Misaki Font ». Disponible en ligne : https://littlelimit.net/misaki.htm (consulté le 11 juin 2024). (En japonais)
22. Grassi, L. ; Khovratovitch, D. ; Rechberger, C. ; Roy, A. ; Schofnegger, M. Poseidon : Une nouvelle fonction de hachage pour les systèmes de preuve {Zero-Knowledge} . Dans Actes du 30e USENIX Security Symposium (USENIX Security 21), Vancouver, BC, Canada, 11-13 août 2021 ; pp. 519-535.
23. Dépôt Circomlib Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/cicomlib (consulté le 21 mars 2024).
24. Dépôt Circomlibjs Github. Disponible en ligne : https://github.com/iden3/cicomlibjs (consulté le 21 mars 2024).
25. Khovratovich, D. Cryptage avec Poséidon. 2019. Disponible en ligne : https://drive.google.com/file/d/1EVrP3DzoGbmzkRmYnyEDcIQcXVU7GlOd/view (consulté le 19 juillet 2024).
26. Dépôt Github Poséidon-Encryption-Circom2. Disponible en ligne : https://github.com/Shigoto-dev19/poseidon-encryption-c ircom2 (consulté le 21 mars 2024).
27. Zhang, Y. ; Wang, S. ; Zhang, X. ; Dong, J. ; Mao, X. ; Longue, F. ; Wang, C. ; Zhou, D. ; Gao, M. ; Sun, G. Pipezk : Accélérer la preuve sans connaissance avec une architecture pipeline. Dans les actes du 48e Symposium international annuel ACM/IEEE 2021 sur l'architecture informatique (ISCA), Valence, Espagne, du 14 au 18 juin 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; pp. 416-428.
28. Kothapalli, A. ; Setty, S. ; Tzialla, I. Nova : Arguments récursifs à connaissance nulle issus de schémas de repliement. Dans Actes de la conférence annuelle internationale sur la cryptologie, Santa Barbara, Californie, États-Unis, 15-18 août 2022 ; Springer : Cham, Suisse, 2022 ; pp. 359-388.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Une approche de navigation coopérative et autonome pour Plusieurs véhicules terrestres sans pilote dans une variable Environnement de communication

Xudong Lin et Mengxing Huang *

École d'ingénierie de l'information et de la communication, Université de Hainan, Haikou 570228, Chine ; linx424523604@163.com

* Correspondance : huangmx09@163.com

Résumé : Les robots aident les intervenants d'urgence en collectant des informations critiques à distance. Le déploiement de plusieurs véhicules terrestres sans pilote (UGV) coopératifs pour une intervention peut réduire le temps de réponse, améliorer la connaissance de la situation et minimiser les coûts. Une communication fiable est essentielle pour plusieurs UGV pour la réponse environnementale, car plusieurs robots doivent partager des informations pour une navigation coopérative et une collecte de données. Dans ce travail, nous étudions une politique de contrôle pour une communication optimale entre plusieurs UGV et stations de base (BS). Un algorithme de gradient de politique déterministe profond multi-agents (MADDPG) est proposé pour mettre à jour la politique de contrôle pour le rapport signal/interférence maximal. Les UGV communiquent à la fois avec les BS fixes et une BS mobile. La politique de contrôle proposée peut naviguer dans les UGV et les BS mobiles pour optimiser la communication et la force du signal. Enfin, un algorithme génétique (GA) est proposé pour optimiser les hyperparamètres de l'entraînement basé sur MADDPG. Les résultats de la simulation démontrent l'efficacité informatique et la robustesse de l'algorithme MADDPG basé sur GA pour le contrôle de plusieurs UGV.

Mots-clés : véhicules terrestres sans pilote (UGV) ; algorithme génétique (GA); gradient politique déterministe profond multi-agents (MADDPG) ; navigation autonome

check for updates

Citation : Lin, X. ; Huang, M. An Navigation coopérative autonome Approche pour plusieurs véhicules sans pilote Véhicules terrestres dans une variable Environnement de communication. Électronique 2024, 13, 3028. https:// doi.org/ 10.3390/electronics13153028

Rédacteurs académiques : Eric Matson et Jeune je suis Cho

Reçu : 18 juin 2024
Révisé : 25 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/ 4.0/).

1. Introduction

Un réseau de véhicules terrestres sans pilote (UGV) distribués et un contrôleur central est connu sous le nom de système de contrôle multi-UGV [1]. Ce système permet une domination autonome, une navigation autonome et une collaboration autonome. Il peut fonctionner soit dans une zone réglementée, soit dans le cadre d'un système de transport plus large. Les systèmes de contrôle multi-UGV offrent une approche unique de la navigation, très fiable, plus économique et propice aux économies d'énergie. Ces dernières années, la demande urgente de systèmes de navigation multi-UGV a encouragé un nombre croissant de discussions dans le monde universitaire [2-5].

La navigation des UGV dans un environnement de communication a fait l'objet de recherches [6], et les méthodes d'optimisation traditionnelles ont donné de bons résultats [7]. Pour créer un système de navigation autonome, D. Chen et al. [8] ont développé un algorithme heuristique de Monte Carlo qui dépend d'une transformée de Hough discrète et d'une localisation de Monte Carlo, ce qui garantit une faible complexité pour le traitement en temps réel. Différent de l'innovation des algorithmes , pour fonctionner de manière robuste dans des environnements inconnus et encombrés, HU Unlu et al. [9] ont créé une approche robuste pour la navigation inertielle assistée par vision qui peut résister aux incertitudes . Contrairement à l'utilisation d'aides visuelles, X. Lyu et al. [10] se sont inspirés d'un point de vue géométrique et ont conçu un nouveau schéma technologique de fusion d'informations de navigation intégré aux facteurs de partage adaptatif qui offre une navigation adaptative dans le cas de systèmes non linéaires et utilise une distribution non gaussienne. Ces méthodes d'optimisation traditionnelles mentionnées ci-dessus sont faciles à mettre en œuvre. Cependant, ces méthodes doivent être présentées avec des conditions préalables, ce qui les rend adaptées uniquement aux environnements statiques. De plus, en réalité, la majorité des scénarios impliquent l'e

Machine Translated by Google

Par conséquent, les systèmes multi-UGV seront confrontés à ces deux défis lors de la gestion de scénarios complexes, et cela nécessite l'intégration de l'apprentissage automatique (ML) pour les résoudre efficacement [12-14].

Il existe de solides raisons d'utiliser des techniques de ML dans la navigation UGV, compte tenu des progrès rapides dans le domaine du ML. Pour obtenir des performances améliorées et de meilleure portée, H. Lee et al. [15] ont fourni une technique ML pour calculer la distance entre la BS et les UGV, ce qui permet la localisation sans aucune infrastructure supplémentaire. Plutôt que de s'appuyer sur la télémétrie directe, HT Nguyen et al. développé un système de coordination entre les véhicules aériens sans pilote et les UGV, permettant une navigation collaborative efficace [15].
Cependant, à mesure que l'environnement de simulation devient plus complexe, l'efficacité de la solution proposée diminue rapidement. Pour relever ce défi, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage par renforcement (RL) est un choix prometteur. RL met l'accent sur la manière dont les agents peuvent découvrir la meilleure politique pour maximiser toutes les récompenses lors de l'interaction avec l'environnement, ce qui la rend bien adaptée à l'exploration et à l'adaptation à des environnements de plus en plus complexes [16].

La recherche a été motivée par des discussions récentes sur l'utilisation de RL pour résoudre le problème de la navigation coopérative multi-UGV [17]. Pour éviter les collisions avec des obstacles, X. Huang et al. [18] ont proposé un système de navigation innovant de planification de chemin local UGV basé sur RL profond qui exploite la perception multimodale pour faciliter l'apprentissage des politiques afin de générer des actions de navigation flexibles. Différent de la navigation UGV unique, pour améliorer l'efficacité spectrale moyenne, S. Wu et al. [19] ont proposé une technologie d'optimisation de trajectoire basée sur un gradient de politique déterministe profond multi-agents commun (F-MADDPG), qui hérite de la capacité de MADDPG à piloter plusieurs UGV de manière coopérative et utilise une moyenne conjointe pour éliminer l'isolement des données et accélérer la convergence. Des progrès significatifs ont été réalisés grâce à ces méthodes de navigation UGV basées sur RL. Cependant, ils négligent les limites des environnements de communication statiques et les problèmes de convergence découlant de la complexité de l'environnement.
Ces deux éléments sont cruciaux à prendre en compte lors de la planification d'une navigation coopérative dans un contexte de communication.

Compte tenu des contraintes de navigation dans la couverture de communication coopérative pour les UGV, il y a trois défis principaux à surmonter, tels que la difficulté du contrôle simultané des UGV, la variation de la couverture de communication et la complexité de l'environnement de contrôle coopératif pour les UGV. Premièrement, les méthodes de contrôle traditionnelles telles que le Q-learning [20], le contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID) [21] et le réseau Q profond [22] donnent souvent des performances sous-optimales en termes de couverture de communication lorsque plusieurs agents nécessitent des opérations simultanées. contrôle. Deuxièmement, compte tenu de la variabilité de l'environnement de communication lors de la navigation multi-UGV, il est courant de rencontrer des zones de mauvaise communication, ce qui entrave une collaboration efficace entre plusieurs UGV.
Cependant, une solution prometteuse pour relever les défis du contrôle coopératif multi-agents est offerte par les algorithmes RL multi-agents [23]. Ces algorithmes guident la collaboration multi-agents à travers le paradigme de formation centralisée et d'exécution décentralisée (CTDE) [24].
De plus, dans notre approche proposée, nous introduisons un UGV BS mobile intégré aux UGV, permettant des changements dynamiques dans l'environnement de communication fixe. Cette collaboration soutient efficacement les tâches de navigation des UGV. Cependant, la complexité accrue de l'environnement construit peut poser des défis en termes d'efficacité et de convergence des algorithmes. Heureusement, nous atténuons les difficultés de convergence en mettant à jour les hyperparamètres dynamiques de manière adaptative à l'aide d'un algorithme génétique (GA) [25]. Plus heureusement, des recherches ont été menées sur l'intégration de GA pour le réglage des hyperparamètres dans les frameworks RL. A. Sehgal et al. ont utilisé un GA pour trouver la relecture d'expérience rétrospective (HER) utilisée dans un gradient politique déterministe profond (DDPG) dans une tâche de manipulation de robot pour aider l'agent à accélérer l'apprentissage (26). Contrairement à la modification d'un seul paramètre, pour le problème de planification flexible des ateliers (FJSP), Chen R et al. ont proposé une méthode d'ajustement des paramètres GA basée sur le Q-learning qui modifie plusieurs paramètres clés du Q-learning pour obtenir des valeurs de récompense plus élevées [27]. Cependant, cette approche basée sur les récompenses a tendance à tomber dans l'optimalité locale. De plus, ces méthodes ne conviennent pas aux scénarios où le nombre d' agents augmente. Pour résoudre ces problèmes, Alipour et al. proposé d'hybrider ur

Machine Translated by Google

une heuristique RL multi-agents pour résoudre le problème du voyageur de commerce. De cette façon, un GA avec un nouvel opérateur de croisement agit comme une heuristique d'amélioration du voyage, tandis que MARL agit comme une une heuristique de construction [28]. Bien que cette approche évite le risque d'optimalité locale, il abandonne le processus d'apprentissage de MARL et l'utilise uniquement comme heuristique, en utilisant plutôt GA pour la formation, ce qui signifie que l'algorithme ne prêtera pas trop d'attention au collaboration entre agents intelligents. Liu et coll. utilisé un système décentralisé partiellement observable méthode de planification de parcours multi-agents basée sur le RL évolutif (MAPPER) pour un apprentissage efficace stratégies de planification locale dans des environnements dynamiques mixtes. Sur la base d'une formation d'apprentissage par renforcement multi-agents , ils ont utilisé GA pour étendre de manière itérative l'algorithme initialement formé. à un modèle plus complexe. Bien que cette méthode évite la dégradation des performances dans les tâches à long terme, l'AG itérative ne s'adapte pas nécessairement bien aux environnements plus complexes [29].

Dans notre recherche, nous combinons les avantages des articles GA mentionnés ci-dessus et adoptons le paradigme CTDE pour mener des recherches dans un cadre RL multi-agents. L'AG attribue différents poids aux mises à jour de l'algorithme en fonction de la contribution de la transition, ce qui signifie que nous accordons plus d'attention aux hyperparamètres qui contribuent davantage à la mise à jour du modèle plutôt que ceux qui obtiennent de plus grandes valeurs de récompense. Cela nous permet d'éviter de tomber dans optimalité locale tout en augmentant le nombre d'agents.

Pour relever ces trois défis et parvenir à une navigation coopérative dans des contextes complexes Dans certains environnements, une nouvelle méthode de navigation dans la couverture de communication multi-UGV est proposée , basée sur un gradient politique déterministe profond multi-agents avec GA (GA- MADDPG). Ce qui suit résume les principales contributions de la méthode de navigation dans la couverture de communication multi-UGV :

- Un modèle multi-agent complet est combiné dans le collaboratif multi-UGV système de navigation, et la coordination optimale des multi-UGV dans la zone de couverture de communication est formulée comme un processus de décision Markov multi-agents en temps réel (MDP). Tous les UGV sont définis comme des agents indépendants dotés de capacités d'autocontrôle.
- Une méthode de navigation collaborative multi-agents avec une couverture de communication améliorée est proposée. En introduisant une station de base mobile, la couverture de communication l'environnement est modifié de manière dynamique. Les résultats de simulation montrent que cette méthode améliore efficacement la qualité de la communication pendant la navigation.
- Une approche adaptative hyperparamétrique basée sur GA est présentée pour optimiser l'UGV. couverture de communication et navigation. Il attribue des poids aux hyperparamètres en fonction du degré de mise à jour de l'algorithme et fait un choix en fonction du taille du poids lors de la sélection suivante, qui est différente de la stratégie traditionnelle à hyperparamètres fixes et peut échapper aux optima locaux.

L'essai est organisé comme suit pour les parties restantes. La modélisation des systèmes de communication et de navigation multi-UGV est expliquée en détail dans la section 2. Les détails de la méthode RL que nous présentons sont décrits dans la section 3. Plusieurs comparaisons expérimentales dans la section 4 servent à vérifier l'efficacité de notre approche. Finalement, nous discutons de l'avenir orientations de recherche et résumer les points clés de l'article dans la conclusion de la section 5.

2. MDP pour la couverture de navigation et de communication pour les multi-UGV dans les environnements

Pour émuler la prise de décision des multi-UGV dans des systèmes du monde réel, nous adoptons un modèle MDP. Avec l'avancement rapide du RL multi-agents, MDP est devenu un modèle de décision fiable [30]. Dans cette étude, nous construisons un environnement complexe avec trois UGV et une BS mobile collaborant et qui comprend divers obstacles. De plus, nous introduisons un concept de communication selon lequel la communication la couverture est déterminée collectivement par quatre BS fixes et une BS mobile.

2.1. Description du problème

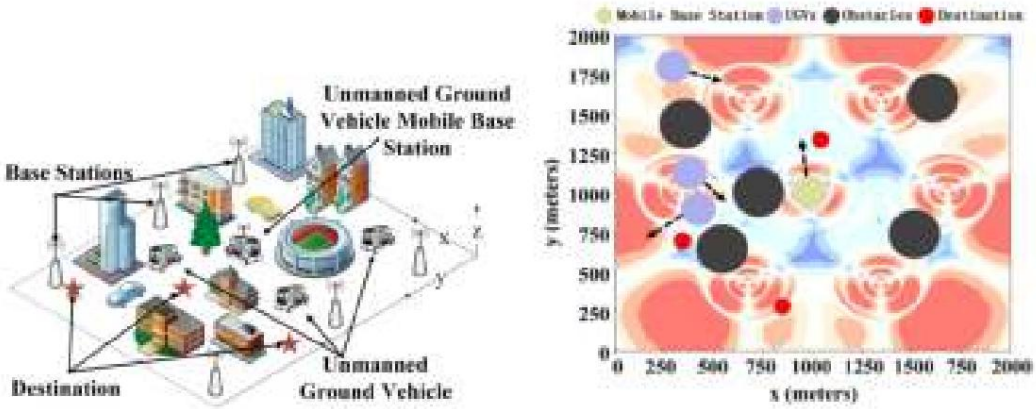
L'objectif principal de notre article est d'accomplir des tâches de navigation multi-agents dans un un large éventail d'environnements à grande échelle, inconnus et complexes le plus rapidement possible. La tâche de navigation nécessite que les UGV puissent collaborer en fonction de différentes caractéristiques environnementales, avec la capacité de surmonter les informations environnementales externes.

Machine Translated by Google

interférences et avec la capacité de suivre des cibles de manière efficace et autonome en temps réel. Plus spécifiquement, l'étendue de la couverture de communication est établie de manière collaborative par les BS stationnaires et les BS mobiles. Dans cette zone de couverture de communication, la BS mobile et les UGV s'engagent dans une navigation coopérative. Nous construisons un scénario de tâche avec de multiples objectifs d'optimisation. L'objectif des UGV est d'atteindre avec succès la destination, tandis que la BS mobile est chargée d'ajuster dynamiquement la couverture de communication en temps réel, dans le but d'optimiser la qualité de communication pour les UGV. Les UGV et les BS mobiles effectuent une navigation coopérative globalement optimale pour atteindre leurs objectifs respectifs et communs.

2.2. Modélisation de l'environnement

Notre travail consiste à simuler un environnement réel dans lequel plusieurs UGV collaborent pour atteindre un point cible. De plus, cet environnement comprend des obstacles qui entravent le mouvement des UGV, reproduisant des scénarios du monde réel. Nous utilisons un environnement de particules multi-agents (MPE) [24] comme environnement de base pour notre développement secondaire, comme le montre la figure 1. Dans cet environnement, nous utilisons des UGV M (où M est défini comme trois), des BS mobiles W (où W est défini comme un), et un certain nombre d'obstacles. L'objectif des UGV est d'éviter les collisions de manière collaborative et d'atteindre leurs points cibles optimaux respectifs tout en tenant compte de la communication dans l'état global. En termes plus Les UGV choisissent un itinéraire d'évitement d'obstacles avec une meilleure communication pour coordonner leurs mouvement vers le point cible (le modèle de communication sera développé dans la section 2.3). La tâche de la BS mobile est d'améliorer la communication entre les trois unités mobiles en ajustant la couverture de communication dans l'état global, comme le montre la figure 1b.



(un) (b)

Figure 1. Diagramme schématique de la collaboration d'un essaim d'UGV dans un environnement de communication . (a) Environnement urbain 3D. (b) Vue de dessus de l'environnement de communication visualisé.

2.3. Modélisation de la couverture de communication

Dans notre simulation, nous avons intégré la communication dans l'environnement MPE et l'avons utilisée comme critère pour évaluer l'achèvement des tâches. Dans cette sous-section, nous présentons le modèle de canal de communication que nous avons adopté, ainsi que le modèle de communication influencé par le mouvement de la BS mobile, comme le montre la figure 1b. La zone de communication dans le cercle rouge du milieu varie en fonction de l'emplacement de la BS mobile, comme illustré sur la figure 2. Notez que les figures 2a à 1 représentent des diagrammes illustrant comment l'environnement de communication change avec le mouvement de la BS mobile à l'étape t. La BS mobile est initialement positionnée au centre sur la figure 2a et évolue progressivement vers le coin inférieur droit, comme illustré sur la figure 2l. Ce déplacement de la BS mobile est motivé par son observation du schéma de déplacement des UGV. Par conséquent, la BS mobile est déplacée du centre vers le coin inférieur droit pour améliorer la qualité de communication dans cette zone, élargissant ainsi la zone de couverture rouge, comme le montre la figure 2. À l'inverse, la relocalisation de la BS mobile est

Machine Translated by Google

La BS mobile entraîne une réduction de la zone de couverture avec une qualité de communication supérieure dans le quadrant supérieur gauche. De plus, pour accentuer l'évolution de la qualité de la communication et améliorer la clarté des changements de communication, nous avons délimité les écarts entre chaque diagramme et son homologue précédent.

Nous avons construit un total de M BS dans l'environnement, où M est défini comme sept et comprend une BS mobile. Le gain de puissance du signal obtenu par les UGV à partir de BS m (m ≤ 7) est défini comme p le t^m. Par la suite, le rapport signal/interférence (SIR) est utilisé comme critère principal d'évaluation de la communication des UGV. Ce critère peut s'exprimer comme suit :

$$SIRt \quad p\frac{\text{C'est t}}{\sum m \quad =It\ p^m} \tag{1}$$

où It {1, · · · , M} représente les BS qui ne sont pas associées aux UGV à l'étape t. Il convient de noter que, par souci de simplicité, nous avons omis les effets du bruit, car il est bien connu que les performances de la communication BS-UGV sont souvent limitées par les interférences. De plus, avec la réutilisation globale des fréquences, nous avons pris en compte la situation la plus défavorable dans laquelle toutes ces stations de base non liées contribuent au terme d'interférence dans l'équation (1). Dans notre étude, les UGV ont reçu la puissance du signal à l'étape t principalement en fonction de leurs positions relatives par rapport aux BS, et pt peut s'écrire :

$$pt = P^{-}\beta(qt)G(qt)\,\tilde{}ht \tag{2}$$

où P^{-} représente la puissance d'émission des BS, tandis que β(qt) représente le gain du canal à grande échelle ; le gain de canal à grande échelle prend en compte les effets de la perte de trajet et de l'évanouissement des ombres. On peut l'exprimer ainsi :

$$\beta(qt) = \beta 0 \quad \frac{}{d0\ d(qt)}^{y} \tag{3}$$

où β0 est l'affaiblissement sur le trajet à la distance de référence d0, d(qt) est la distance entre l'UGV et la BS, et γ est l'exposant de l'affaiblissement sur le trajet. Et G(qt) désigne le gain de l'antenne BS ; le gain de l'antenne BS prend en compte le gain directionnel de l'UGV par rapport à l'antenne BS. Il peut être représenté par le diagramme de rayonnement de l'antenne, qui est généralement exprimé comme suit :

$$G(qt) = Gmax \cdot A(\theta t\ ,\ \varphi t) \tag{4}$$

où Gmax est le gain maximal de l'antenne et A(θt , φt) est la fonction de gain de la position de l'UGV par rapport à la direction du lobe principal de l'antenne. Ces paramètres dépendent généralement de l'emplacement qt de l'UGV. De plus, la variable aléatoire ˜ht est utilisée pour incorporer les effets de l'évanouissement. Il est important de noter que chaque UGV possède un SIR indépendant à chaque étape t, qui est utilisé pour évaluer les performances de communication des UGV à ce moment précis. Il convient également de noter que lors de l'initialisation du scénario, les positions initiales de toutes les stations de base, y compris la station de base mobile, sont fixes, c'est-à-dire qu'elles sont toutes à une position fixe, puis les trois UGV et la station de base mobile. sont formés pour entreprendre différentes actions via la stratégie, moment auquel, sur la base de l'action sélectionnée, la position suivante de la station de base mobile est déterminée ensemble par l'action sélectionnée ainsi que par la position d'origine. La valeur de qt est fixe à ce stade car qt n'est lié qu'à la variable de position (x, y). On peut voir que la position initiale de la BS mobile est prédéfinie, tandis que le qt suivant est la variable de décision et est déterminé par l' action de la BS mobile, qui vise à fournir un meilleur environnement de communication aux UGV restants.

Machine Translated by Google

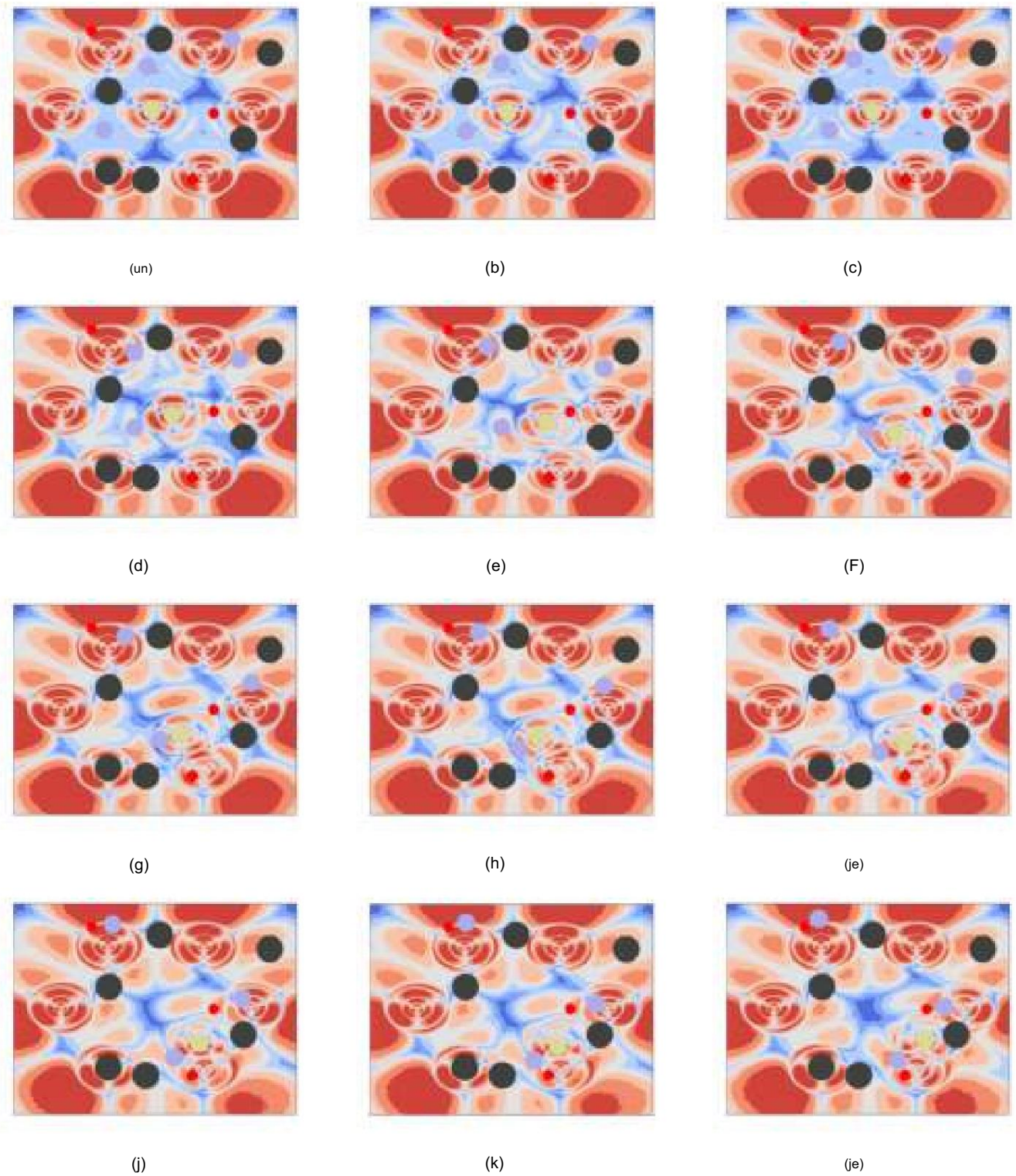


Figure 2. Les résultats de l'évolution de la communication dans l'environnement à mesure que la BS mobile se déplace. Le les zones rouges indiquent une meilleure communication, tandis que les zones bleues indiquent une mauvaise communication, Les cercles marron représentent les BS mobiles, les cercles bleus représentent les UGV, les cercles noirs représentent les obstacles, et les cercles rouges représentent les points cibles. Ce mouvement vise à améliorer la qualité de la communication pour les UGV.

Machine Translated by Google

2.4. L'état et l'action des UGV L'état des

UGV est noté s = (s1,s2, . . . ,sN). Pour chaque UGV u, l'état est défini comme su = (sPu,sEu), où sPu = xu, yu, vxu, vyu, SIRu est une combinaison de position (xu, yu), de vitesse (vxu, vyu) et SIRu . De plus, sEu = xug, yug, x0, y0, vox, voy représente les données selon lesquelles les UGV observent d'autres UGV ou obstacles. Le terme su décrit les positions de l'agent dans un système de coordonnées. Cependant, dans de nombreuses situations réelles, il peut s'avérer impossible d'acquérir des emplacements absolus. Par conséquent, l'agent et les barrières peuvent être modélisés dans un système de coordonnées polaires pour le mouvement. Dans notre formulation originale, sEu = xug, yug, x0, y0, vox, voy est destiné à représenter les données observées pour chaque UGV u. Pour clarifier, (xug, yug) représente la distance entre l' entité g (y compris les UGV et tous les obstacles) et l'UGV u. Et (x0, y0) représente la position des coordonnées globales de l'UGV u.
Grâce à une série de calculs de transformation, nous pouvons également obtenir les positions globales d'autres entités observées par UGV u. La combinaison de ces composants permet à chaque UGV de naviguer vers son objectif tout en tenant compte de la présence et du mouvement des obstacles ou autres UGV.

L'action des UGV est notée a = (a1, a2, . . . , aN), qui est définie comme un ensemble d'actions individuelles pour chaque UGV dans un système multi-agents. Dans cet article particulier, le mouvement des UGV est simplifié en supposant une vitesse initiale de 0 et une accélération constante, qui est représentée par une formulation : vt = v0 + at, qui est définie comme un vecteur à 2 dimensions.

2.5. Fonction de récompense

L'objectif principal est de trouver la stratégie collaborative optimale pour un état spécifique afin de naviguer de manière collaborative pendant l'étape t et l'étape suivante t + 1 avec une communication améliorée. À l'étape t, l'état spécifique est noté st . La récompense d'agir à peut être représentée par r(st , at). Par conséquent, la récompense totale de l'adoption d'une politique π peut être exprimée comme suit :

$$R(\pi) = L\sum\gamma^{t} r(s_t, \pi(s_t)) \mid s_0 = s \quad (5)$$

Notre objectif est de déterminer la stratégie optimale, notée π^{*}, qui maximise le récompense globale tout en respectant toutes les contraintes données. L'objectif principal de l'article est d'obtenir la politique qui produit la récompense la plus élevée possible, notée R(π), parmi toutes les politiques possibles π.

Il est à noter que les principes de navigation des BS mobiles sont similaires à ceux des UGV. Les UGV et les BS mobiles peuvent utiliser des principes similaires pour la planification de trajectoire et l'évitement d'obstacles en fonction de leurs positions cibles et des données environnementales actuelles. Les tâches des UGV sont triples : Premièrement, les UGV atteignent leur destination grâce à une navigation collaborative. Deuxièmement, les UGV devraient essayer d'éviter les collisions. Troisièmement, les UGV doivent voyager dans un environnement de communication de haute qualité. La BS mobile n'a que deux tâches : la première consiste à travailler avec les UGV pour ajuster la couverture de communication en ajustant la position, garantissant ainsi que les UGV se déplacent dans une plage de communication de haute qualité. La première consiste à éviter autant que possible les collisions, ce qui est similaire à l'objectif des UGV. Il est également important de noter que la position initiale de la BS mobile est au centre même de la scène dans tous les scénarios que nous mettons en place et qu'elle co-mouve avec les UGV sans les préempte
Ainsi, dans ce modèle de formation, la fonction de récompense des UGV se compose principalement de trois parties reposant sur un fondement théorique. Premièrement, cela est lié à la distance entre les UGV et le point cible. Deuxièmement, il est lié au nombre de collisions, y compris les collisions entre UGV, les collisions entre UGV et la BS mobile, et les collisions entre UGV et obstacles. Enfin, il est lié au SIR obtenu par les UGV à l'étape t, qui peut être formulé comme r(st , at).

$$r(s_t, a_t) = SIR_t - D(UGV, cible) - coll \quad (6)$$

où SIRt représente la qualité de communication globale obtenue par tous les UGV à chaque étape t, et la définition de SIRt a été présentée en détail dans l'équation (1).
D(UGV, cible) représente la somme des longueurs entre tous les UGV et leurs

Machine Translated by Google

destinations à chaque étape t ; il est à noter qu'aucun UGV n'a de destination fixe à atteindre, ce qui signifie que tous les UGV attribueront de manière autonome la destination à atteindre en fonction de leurs stratégies et observations. Le terme coll représente le nombre de collisions survenues entre tous les UGV à chaque étape t.

La formule de calcul du SIRt dans l'équation (6) a été introduite dans la section 2.3.
La communication a un impact direct sur la fonction de récompense des UGV, où une communication plus élevée se traduit par une récompense plus importante. Par conséquent, les UGV sont incités à prioriser les emplacements offrant une meilleure communication, les encourageant à se déplacer largement vers ces zones.

D(UGV, cible) est calculé par :

$$D(UGV, cible) = \sqrt{(xu - xtarget)^2 + (yu - ycible)^2} \quad (7)$$

où (xu, yu) contient des informations de coordonnées pour tous les points cibles, ce qui indique que la perte diminue également à mesure que la distance entre les UGV et la destination diminue.
Par conséquent, une perte moindre correspond à une récompense plus élevée. Essentiellement, les UGV sont plus susceptibles de recevoir une récompense plus importante lorsqu'ils se trouvent à proximité du point cible.

Le terme coll peut être confirmé comme suit :

$$coll = \begin{cases} 0, \text{ si } D(UGV, tuple) > K \\ -1, \text{ si } D(UGV, tuple) \le K \end{cases} \quad (8)$$

où D (UGV, tuple) représente les distances entre les UGV et diverses entités telles que d'autres UGV, la BS mobile et les obstacles dans le scénario donné. De plus, un « K » constant est utilisé pour évaluer la possibilité d'une collision. Si la distance entre deux entités est inférieure à la valeur de K, une collision est enregistrée. Par conséquent, en employant cette approche, les multi-agents collaborent pour minimiser l'apparition de collisions.

3. Navigation de couverture de communication multi-agents RL avec GA Dans cette

section, nous décrivons un résumé concis de la formulation MDP pour la navigation de couverture de communication avec coopération entre la BS mobile et les UGV.
Ensuite, nous introduisons l'algorithme DDPG [31], conçu pour un espace de contrôle continu. En nous appuyant sur ces fondations, nous développons un algorithme RL innovant appelé GA-MADPPG pour relever les défis de la couverture des communications et de la navigation. L' algorithme GA-MADPPG comprend deux composants principaux. Tout d'abord, nous adoptons l' algorithme MADPPG, qui étend DDPG selon le paradigme CTDE. Cela nous permet de tirer parti des avantages de MADPPG dans la gestion des systèmes multi-agents et des problèmes de contrôle continu.
Deuxièmement, nous intégrons GA dans l'algorithme MADPPG, permettant des mises à jour des hyperparamètres en temps réel basées sur la fonction de perte pendant le processus de formation. La politique proposée met en évidence la capacité de l'algorithme GA-MADPPG à ajuster dynamiquement les hyperparamètres en fonction de la fonction de perte. En combinant ces deux composants, GA-MADPPG vise à obtenir une couverture de communication et une navigation efficaces dans des environnements complexes.

3.1. Modèle MDP

Le jeu de Markov multi-agents, une extension significative du MDP dans un scénario multi-agents, fait l'objet de [32]. Dans ce jeu, l'état théorique de N agents est représenté par s. A chaque époque t, les agents gardent une trace de l'état actuel st et sélectionnent une action à . Suite à cela, l'état entre dans l'état suivant st + 1, et tous les agents reçoivent une récompense, r(st , at).

Pour l'évaluation des fonctions action-valeur et des fonctions de valeur de mappage état-action, le calcul de la fonction de valeur pour les politiques stochastiques implique :

$$V\pi(st) \models E \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^{l} r(st+l, à+l) \mid St \right] \quad (9)$$

Machine Translated by Google

où le facteur d'actualisation est γ [0, 1). Et la fonction action-valeur est calculée comme suit :

$$Q\pi (st , à) = E \sum_{l=0}^{\infty} l\gamma\ r(st+l , à+l) \mid rue , à \quad (dix)$$

Apprendre un π idéal de * l'objectif est une stratégie qui optimise le rendement global attendu tous les agents.

$$\pi^{*} = \text{argument} \max_{\pi} E \sum_{t=0}^{\infty} t\gamma\ r(st , à) \quad (11)$$

3.2. Fondamentaux de l'approche DDPG

DDPG est un algorithme de gradient politique déterministe profond développé pour résoudre les problèmes de contrôle d'action continue. Il est basé sur des gradients politiques et ajuste directement les paramètres politiques θ pour optimiser la fonction objectif.

$$J(\theta) = Es \quad p\pi \mid,a \quad \pi\ \theta \quad (12)$$

qui est l'idée centrale du DDPG, car elle implique de prendre le gradient politique θ J(θ) à chaque étape. Le gradient politique peut être exprimé comme suit :

$$\theta\ J(\theta) = Es \quad p\pi ,a \quad \pi\ \theta\ [\quad \theta \log \pi\ \theta\ (a \mid s)Q\ \pi\ (s, a)] \quad (13)$$

où Qπ (s, une) = E R | s distribution.t = s, une = a est une fonction action-valeur, et p π est l'état

Les politiques déterministes peuvent également être intégrées dans le cadre du gradient politique et sont notées μθ : S →A [1]. Plus précisément, dans certaines circonstances, on peut écrire le gradient de l'objectif J(θ) = Es p μ [R(s, a)] comme suit :

$$\theta\ J(\theta) = Es \quad D \quad \theta\mu\theta\ (a \mid s) \quad aQ\ \mu\ (s, a)\mid a=\mu\theta\ (s) \quad (14)$$

Le théorème exige que l'espace d'action a soit continu, car il dépend de aQμ (s, a).

Les réseaux de neurones profonds sont utilisés dans la méthode DDPG, qui est une variante de l'algorithme déterministe du gradient de politique, pour estimer la politique μ et le Qμ critique. Il s'agit d'une approche hors politique , ce qui signifie qu'elle apprend des expériences acquises au cours de la formation. En plus du réseau en ligne, DDPG utilise également un réseau cible pour stabiliser la formation. Le réseau cible est périodiquement révisé pour atténuer les effets des oscillations politiques pendant l'apprentissage.

3.3. Dégradé politique déterministe profond multi-agents

La politique DDPG démontre la robustesse inhérente et les capacités de généralisation de l'agent, conduisant à des performances maximisées [31]. Cet avantage rend DDPG particulièrement bien adapté à l'apprentissage dans des circonstances difficiles où des inconnues et des interférences externes sont présentes. À la lumière de cela, nous avons adopté un paradigme de formation pour la navigation dans la couverture de communication basé sur le MADDPG. L'agent dans l'environnement est autonome et incapable d'interagir avec d'autres agents, pourtant il est perceptible. A chaque étape t, l'agent est incapable d'observer les schémas de mobilité actuels des autres agents. L'avantage du CTDE est qu'il élimine le besoin de faire des compromis entre les agents, et l'objectif d'optimisation est d'augmenter le rendement total de tous les agents [33].

$$G = \quad s\hat{}, a, p,r, o, u \quad (15)$$

où u représente l'index de chaque agent et sˆ stocke les statuts globaux et les observations locales de chaque agent . Le terme a est une représentation de l'activité de tous les agents, et la récompense de chaque agent fait partie du tenseur r. La fonction d'observation est indiquée par o et p représente la probabilité d'une transition de l'état actuel à l'état suivant.

Machine Translated by Google

Plus précisément, le jeu comporte N agents et stratégies paramétrés par θ = {θ1, . . . , θN}. Le terme π = {π 1, . . . , π N} représente la collection de toutes les politiques d'agent. Pour l'agent i, le gradient du rendement attendu, noté J(θi) = E[Ri], peut ainsi s'exprimer comme suit :

$$\theta i\, J(\theta i) = Es\ \ p\ \mu, ai\ \ \pi\ i\ [\ \ \theta i \log \pi\ i(ai \mid oi)\ \ Q^{\pi}_{\mu}(x, a1, \ldots, uneN)] \quad (16)$$

notre cadre, le total des actions a1, . . . , aN sont introduits dans la fonction $_{\mu}$ (x, a1, . . . , aN), qui est a Dans action-valeur centralisée Qπ qui produit la valeur Q pour l'agent i ainsi que certaines données d'état. Dans le scénario le plus simple, les états pourraient être la somme des observations faites par chaque agent (o1, . . . , oN), mais s'ils sont accessibles, nous pourrions également incorporer des données d'état supplémentaires.
Les agents sont autorisés à avoir n'importe quel système d'incitation, même ceux qui offrent des récompenses rivales dans un environnement hostile. Cependant, dans cet article, nous définissons la fonction de récompense comme le total des récompenses pour tous les agents puisque notre recherche se concentre sur des situations dans lesquelles tous les agents coopèrent pour atteindre un objectif commun, ce qui entraîne des récompenses coopératives.

Le concept mentionné peut être étendu pour s'appliquer aux politiques déterministes. Maintenant que nous avons N politiques continues μθi paramétrées par θi , nous pouvons exprimer le gradient comme suit :

$$\theta i\, J(\mu i) = Ex,a\ \ D[\ \ \theta i\, \mu i\, (ai \mid oi)\ \ aiQ^{\mu}_{\mu}(x, a1, \ldots, aN)|ai=\mu i\, (oi)\ ] \quad (17)$$

où les transitions (x, x que tous ', a1, . . . , uneN,r1, . . . ,rN) sont stockés dans le tampon de relecture D, qui stocke les agents expérimentent.

Les politiques des autres agents doivent être mises à jour pour que l'équation (17) soit appliquée. Connaître les observations et les politiques des autres agents n'est pas une hypothèse particulièrement restrictive, car cette information est généralement disponible pour tous les acteurs si notre objectif est d'éduquer les agents à présenter un comportement communicatif sophistiqué en simulation.

3.4. L'algorithme génétique

GA est un modèle informatique inspiré de la théorie de l'évolution biologique de Darwin et utilisé pour rechercher des solutions optimales en simulant l'évolution naturelle. Il opère directement sur les objets structurels, évitant les contraintes de différenciation et de continuité de fonction [34-36]. Doté d'un parallélisme implicite inhérent et d'une forte capacité d'optimisation globale, il utilise des méthodes d'optimisation probabilistes pour obtenir et guider automatiquement l'espace de recherche sans règles strictes, permettant ainsi des ajustements adaptatifs de la direction de recherche. GA cible tous les individus d'une population et explore efficacement un espace de paramètres codés à l'aide de techniques de randomisation. Ses opérations génétiques comprennent la sélection, le croisement et la mutation. Les principaux composants d'un GA sont le codage des paramètres, la configuration initiale de la population, la conception des fonctions de fitness, la conception des opérations génétiques et la configuration des paramètres de contrôle. Pour démontrer le fonctionnement d'un GA, nous considérons un problème d'optimisation sans contrainte. L'objectif est de maximiser la fonction suivante :

$$\text{Maximiser } f(k),\ k \quad {}^{\mu}_{n} \le kn \le k^{toi}_{n},\quad n = 1, 2, \ldots, N. \quad (18)$$

La variable ki peut prendre des valeurs comprises dans l'intervalle k_n et k_u. Bien que nous considérions un problème de maximisation, un GA peut également être utilisé pour des problèmes de minimisation. Pour assurer le bon fonctionnement de l'AG, les étapes suivantes sont suivies.

Les variables ki dans l'équation (18) sont initialement codées dans des structures de chaînes spécifiques avant d'utiliser les GA pour résoudre le problème susmentionné. Il est essentiel de mentionner que le codage des variables n'est pas toujours requis à cette étape. Dans certaines études, les AG sont directement appliquées aux variables, mais dans le but de discuter des idées fondamentales d'une AG simple, nous ne tiendrons pas compte de ces exceptions.

Machine Translated by Google

La fonction fitness est évaluée pour chaque individu de la population initiale puis pour chaque nouvelle génération après application des opérateurs génétiques de sélection, de croisement et de mutation. Puisque la condition physique de chaque individu est indépendante de celle des autres, un calcul parallèle est réalisable.

De telles transitions peuvent prendre de nombreuses formes différentes. Vous trouverez ci-dessous deux cartographies de condition physique couramment utilisées .

$$F(k) = 1 \quad \frac{1}{+ f(k)} \tag{19}$$

Cette transformation convertit un problème de minimisation en un problème de maximisation équivalent sans changer la position du minimum. La fonction objectif peut être transformée à l'aide d'une fonction différente pour fournir la valeur de fitness F(i), comme indiqué ci-dessous :

$$F(i) = V - \sum_{je=1} \quad \frac{O(i)P}{P. \quad O(je)} \tag{20}$$

où V est une valeur élevée pour garantir des valeurs de condition physique non négatives, P est la taille de la population et O (i) est la valeur de la fonction objectif du nième individu. Pour cette étude, V est choisi comme valeur maximale du deuxième terme dans l'équation (20), conduisant à une valeur de fitness de zéro, qui est égale à la valeur maximale de la fonction objectif. Cette transformation ne modifie pas la position de la solution ; il convertit simplement un problème de minimisation en un problème de maximisation équivalent. Le terme « fitness de chaîne » fait référence à la valeur de la fonction de fitness d' une chaîne.

Les opérateurs génétiques tels que la sélection, le croisement et la mutation sont appliqués à la population, produisant une nouvelle génération basée sur les individus les plus en forme de la génération actuelle. L'opération de sélection sélectionne les individus présentant des avantages dans la population actuelle. L' opération de croisement ou de recombinaison crée des descendants en échangeant une partie des chromosomes entre deux individus sélectionnés, ce qui donne naissance à deux nouveaux chromosomes représentant la progéniture. L'opération de mutation modifie de manière aléatoire une ou plusieurs valeurs chromosomiques (gènes) de chaque individu nouvellement créé. Les mutations se produisent généralement avec une très faible probabilité.

3.5. GA-MADDPG pour aborder la couverture des communications et la navigation dans sa propre formulation abstraite

Dans la formulation abstraite de la section 3.1, la politique de la fonction objectif peut être exprimée par π (st) = at(st). Dans chaque épisode j, l'objectif est d'optimiser la fonction objectif en sélectionnant la meilleure coordination et l'action optimale (a) pour chaque état (s). Différents agents sont chargés de naviguer eux-mêmes pour atteindre le point cible, et chaque agent adopte une stratégie indépendante. Pour remédier aux limitations et explorer divers scénarios, nous utilisons des méthodes hors politique au lieu de méthodes sur politique, car la hors politique est plus puissante et généralisée. Il garantit que les données sont complètes et que toutes les actions sont couvertes. Il peut même provenir de diverses sources, auto-générées ou externes [37]. La figure 3 illustre les points saillants du GA-MADDPG proposé.

Toutes les critiques seront mises à jour simultanément pour réduire la fonction de perte de régression combinée pour l'épisode j :

$$L(\theta i) = \quad \frac{1}{S} \sum_{j} \quad j - Q \, y \, {}^{\mu}_{\ldots} \quad Xj \, , \, aa \, {}^{j}_{1 \, , \, \ldots \, , \, N} \, j \quad {}^{2} \tag{21}$$

L'acteur est mis à jour à l'aide du gradient de politique échantillonné :

$$1 \quad \theta i \, J \approx \overline{S} \sum_{j} \quad \theta i \, \mu i \, (o \quad {}^{j}_{\ldots}) \quad aiQ \quad {}^{\mu}_{\ldots} \, (\, xj \, , \, {}^{un \, j}1 \, , \, \ldots \, , \, ai \, , \, \ldots \, , \, {}^{un \, j}N \,) | \, j \, ai = \mu i \, (o \, {}^{j}_{\ldots}) \tag{22}$$

Machine Translated by Google

Et la fonction action-valeur centralisée Q μ_i est mis à jour comme :

$$L(\theta i) = Ex,a,r,x'[(Q \mu_i(x, a1, \ldots, aN) - y)^2], \quad y = ri + \gamma Q \mu_i'(X', a'1, \ldots, a'N)|_{aj=\mu j(oj)} \tag{23}$$

où

$$\mu' = \mu\theta'_1, \ldots, \mu\theta'_N \tag{24}$$

est l'ensemble des politiques d'objectif avec des paramètres différés θi .

Le processus de formation de l'algorithme GA-MADPPG est résumé dans l'algorithme 1.

Nous utilisons une formation DDPG hors politique pour maximiser la récompense.

Algorithme 1 Algorithme GA-MADDPG

Exiger : état d'entrée s, facteur d'actualisation γ et action a
Initialisation : Initialiser l'environnement MPE avec quatre agents (dont 3 UGV et 1 BS mobile) ;
Initialisez la population d'hyperparamètres.
Ecount = 0
pour l'épisode = 1 à l'épisode maximum.
Réinitialisez les environnements, collectez les observations initiales des
agents pour l'étape = 1 à l'étape
maximale. Choisissez At pour
chaque agent . Les agents prennent At et reçoivent les $'_i$
observations suivantes. o Calculez la récompense totale dans l'équation (6).)
Stockez les transitions de tous les agents dans D et stockez le L des transitions dans D.
Ecount = Ecount + 1 si
Ecount ≥mettre à jour l'épisode alors
pour g = 1 pour critiquer les étapes de mise à jour
Échantillon du lot B de D j
Définir $y^j = r^j_i + \gamma Q'_i(X'^j, a'^1, \ldots, a'^N)|_{a'k=\mu'k(o'k^j)}$
Minimiser la perte dans l'équation (21) pour mettre à jour le
critique Mettre à jour l'acteur en utilisant le gradient politique échantillonné selon l'équation (22)
Évaluer l'aptitude de la population d'hyperparamètres selon l'équation (19)
Population d'hyperparamètres croisés Opération de mutation
Définir une nouvelle population
d'hyperparamètres en fonction de D. fin pour Mettre à jour les paramètres cibles : θ i

$$\theta'_i \leftarrow \tau\theta_i + (1 - \tau)\theta'_i$$

Ecount = 0 fin
si fin
pour fin
pour

Machine Translated by Google

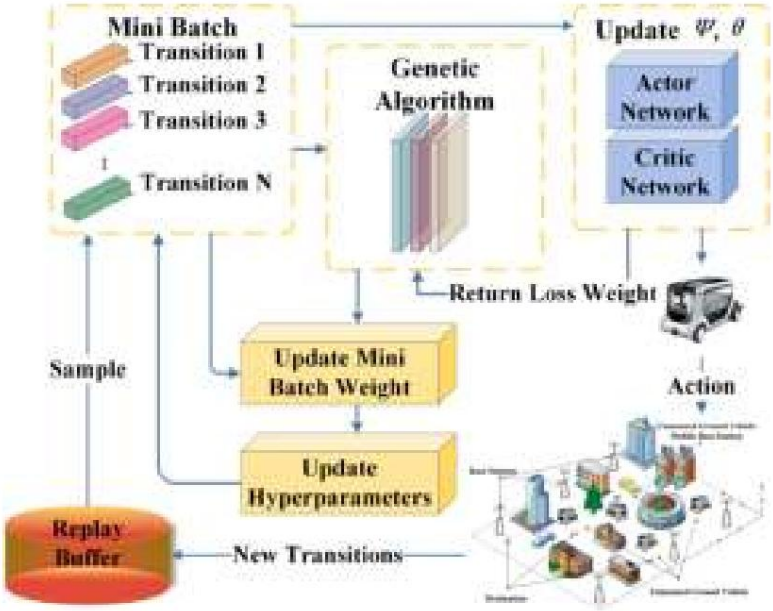


Figure 3. Schéma détaillé de l'algorithme GA-MADDPG.

4. Résultats des simulations

Dans cette section, nous présentons des exemples illustratifs pour décrire la configuration expérimentale de cet article. Sur la base de ces exemples, nous proposons plusieurs mesures pour évaluer l'efficacité de l'algorithme et effectuer une analyse quantitative pour clarifier les avantages de notre approche et de notre politique de modélisation représentée. Par la suite, nous présentons les résultats de simulation numérique pour démontrer l'efficacité et l'efficience des algorithmes. De plus, nous fournissons des commentaires perspicaces sur les résultats.

4.1. Paramètres des expériences

Dans cette sous-section, nous présentons les paramètres précis des coefficients expérimentaux. La zone simulée est une région urbaine dense de 2 × 2 km² avec sept sites BS cellulaires. La figure 4 présente une vue de dessus du modèle de canal présenté dans cet article, où sept stations de base au sol sont représentées par des étoiles bleues à cinq branches, et l'étoile bleue à cinq branches au milieu représente la station de base mobile. Chaque station de base comporte trois groupes de base. Puisqu'il y a sept stations de base au total, le nombre d'unités est de 21. La puissance d'émission de la cellule unitaire est définie sur Pm = 20 dBm, le seuil d'interruption de communication est défini sur γth = 0 dB et la puissance de bruit est définie comme δ^2 = −65 dBm. Cet article adopte le modèle d'antenne de station de base requis par la spécification 3GPP. Par souci de simplicité, nous supposons que la hauteur opérationnelle des UGV est fixée à 0 m, sans tenir compte de l'influence des montées et descentes du terrain. Les valeurs spécifiques des paramètres intervenant dans l'environnement simulé sont les suivantes : le nombre d'UGV est fixé à quatre (dont une BS mobile), le nombre d' obstacles est fixé à cinq dans les zones principales et il y a trois points cibles. Les positions de ces éléments sont randomisées à chaque apparition. Comme nous utilisons un mécanisme de mise à jour dynamique pour les hyperparamètres, nous répertorions les paramètres communs de l'algorithme de base et de l'algorithme GA-MADDPG dans le tableau 1, et nous répertorions également la population d'hyperparamètres initiale de l'algorithme GA-MADDPG dans le tableau 2.

Dans cette étude, il est important de noter que l'environnement de communication est uniquement déterminé par le positionnement de chaque UGV. La qualité de la communication entre plusieurs UGV n'influence pas leur navigation collaborative. En effet, le processus de navigation collaborative repose exclusivement sur un algorithme multi-agents pour coordonner les UGV dans l'exploration environnementale.

Machine Translated by Google

Tableau 1. Paramètres des paramètres GA-MADDPG.

Définition	Valeur	Définition	Valeur
Nombre maximum d'épisodes	60 000	Taille du mini-lot	512
Tampon de relecture capacité	1 000 000	Facteur de remise	0,99
Étapes par mise à jour	100	Taux d'apprentissage	0,0001
Nombre maximum de pas par épisode	25	Mettre à jour le taux de population	100
Longueur du pas de temps	1	Dimension cachée	64

Tableau 2. Population d'hyperparamètres initiale de l'algorithme GA-MADDPG.

Facteur de remise	Taux d'apprentissage	Capacité du tampon de relecture	Taille du mini-lot
0,9	0,01	10 000	512
0,95	0,001	100 000	1024
0,99	0,0005	1 000 000	2048

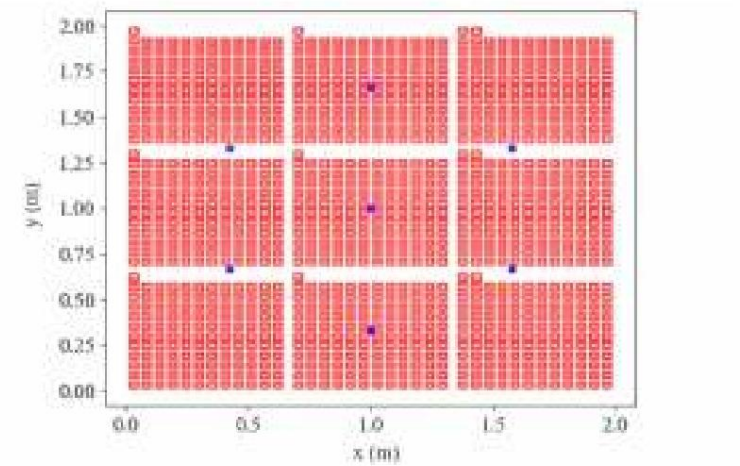


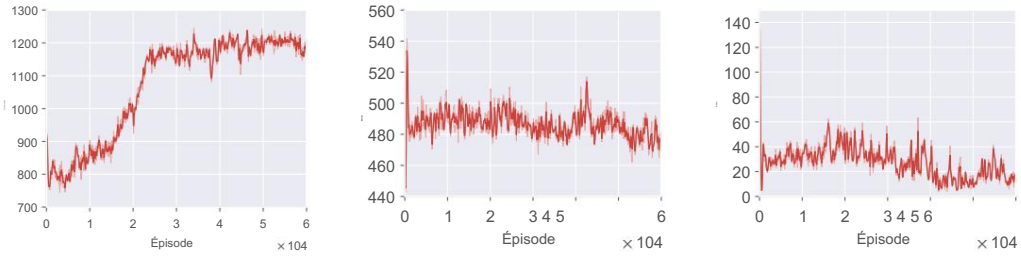
Figure 4. Vue en plan de la distribution du modèle de station de base.

4.2. Indicateurs d'évaluation de la navigation UGV

Pour mesurer objectivement la sécurité de la navigation, l'efficacité, la robustesse et la connexion de communication des UGV, nous avons développé des indicateurs d'évaluation spécifiques, qui sont détaillé ci-dessous. Nous avons également enregistré l'évolution de l'état des mesures d'évaluation, comme le montre Graphique 5.

- Retour de communication. Le retour de communication est le retour de communication moyen qualité par épisode pour les UGV et est calculé sur la base de l'équation (1). Les retours de communication convergent rapidement de la valeur initiale de -800 à -300, comme le montre la figure 5a, ce qui indique que la qualité de la communication s'est améliorée et s'est stabilisée dans un intervalle.
- Temps de collision : Les temps de collision sont la somme des collisions entre les UGV et obstacles et entre drones et drones dans un tour moyen. L'indicateur de collision converge de 540 vers en dessous de 480, comme le montre la figure 5b, indiquant que le le nombre de collisions a également été quelque peu réduit, et comme cette étude permet les UGV doivent avoir un certain nombre de collisions, l'indicateur de collision n'est pas le principal objectif d'optimisation.
- Temps extérieurs : Les temps extérieurs sont le nombre de fois où les UGV sortent des limites. et manquer de l'environnement que nous avons défini. D'après la figure 5c, la réduction rapide du le nombre de fois où nous avons dépassé les limites indique que notre recherche a considérablement violations limitées et inefficaces des frontières, démontrant que notre étude a effectivement opère dans la zone désignée.

Machine Translated by Google



(un) (b) (c)

Figure 5. Trois indicateurs d'évaluation pour la navigation UGV. (a) Retour de communication. (b) Collision nombre. (c) En dehors des horaires.

4.3. Expérimentation comparative GA-MADDPG

Pour comparer avec l'algorithme suggéré et déterminer si l'algorithme fonctionne mieux, nous proposons sept approches RL qui sont considérées comme des lignes de base. Le les méthodes sont MADDPG [24] : un gradient de politique déterministe profond multi-agent classique, R-MADDPG [38] : un acteur-critique multi-agents profondément récurrent, MAPPO [39] : multi-agents optimisation de la politique proximale, RMAPPO [39] : une politique proximale multi-agents profondément récurrente optimisation, MQMIX [40] : factorisation de la fonction de valeur monotone mellow-max pour les multi-agent, MASAC [41] : un acteur-critique doux multi-agent classique, MAD3PG [42] : un gradient politique déterministe distributionnel profond multi-agent, MATD3 [43] : le jumeau retardé gradient politique déterministe profond, et RMATD3 [44] : le jumeau déterministe profond retardé gradient politique avec une profonde récurrence. Notamment, nous reproduisons ces lignes de base en utilisant le même environnement de simulation pour garantir que l'expérience est équitable.

Le retour cumulé du GA-MADDPG et des autres algorithmes, qui s'affiche dans la figure 6, indique les résultats de la comparaison expérimentale et met en évidence la puissance de Algorithmes GA-MADDPG. GA-MADDPG surpasse les autres algorithmes en atteignant un retour de récompense considérablement plus élevé d'environ -1 200 avec 60 000 épisodes, atteignant son point de convergence. De plus, comme le montre la figure 6, MADDPG et R-MADDPG obtenez des récompenses inférieures d'environ -1600 par rapport à GA-MADDPG, offrant de fortes preuve de l'efficacité de notre contribution : l'utilisation d'hyperparamètres adaptatifs GA permet de meilleurs sauts hors des optima locaux et des récompenses plus élevées. Comme le montre la figure 6, dans l'environnement spécifique que nous avons configuré, ni l'algorithme MADDPG d'origine ni sa variante intégrant des réseaux récurrents profonds surpasse GA-MADDPG dans les domaines de vitesse de convergence et résultats finaux de la convergence : GA-MADDPG converge vers environ 2000 épisodes, alors que R-MADDPG converge en environ 5000 épisodes, et l'algorithme original MADDPG converge encore pire. Plus important encore, nos résultats expérimentaux révèlent que MASAC, MAPPO, MAD3PG, MQMIX et RMAPPO rencontrent des défis dans atteindre un état de convergence souhaitable dans l'environnement coopératif multi-agents nous avons construit. MASAC a nécessité environ 25 000 épisodes pour converger. se stabilisant à une valeur de récompense d'environ −1 800. MAPPO et RMAPPO exposés convergence moins stable, avec des récompenses fluctuant entre −2000 et −2500. Entre-temps, La récompense de MAD3PG a convergé vers environ −2 100. Concernant MQMIX, sa récompense a démontré une oscillation initiale au cours des 25 000 premiers épisodes, suivie d'une baisse constante par la suite. Cela souligne encore la supériorité de GA-MADDPG en termes de performance et efficacité.

De plus, certains algorithmes ont tendance à converger vers des optima locaux, ce qui renforce encore l'efficacité de notre décision d'adopter l'algorithme MADDPG et d'améliorer il. Comme le montre la figure 6, au cours des 25 000 premiers épisodes, GA-MADDPG pourrait succomber à optimalité locale. Cependant, l'incorporation du mécanisme GA permet à GA-MADDPG pour obtenir des récompenses élevées au-delà de ce seuil. Notamment, MAPPO et MQMIX affichent des performances médiocres, probablement en raison du manque de mises à jour adaptatives des hyperparamètres, entravant leur coopération efficace dans l'environnement multi-agents et dirigeant

Machine Translated by Google

aux défis de la convergence. Par conséquent, cette observation démontre naturellement la grande efficacité de l'intégration de GA dans les algorithmes RL multi-agents. En introduisant GA, les algorithmes multi-agents peuvent éviter plus efficacement de tomber dans les optima locaux, ce qui entraîne une amélioration de la vitesse et des résultats de convergence. Et la variation de la perte calculée par l'équation (21) est représentée par la figure 7, à partir de laquelle on peut voir la convergence constante de la perte vers près de 1 800, ce qui peut prouver la convergence de l'algorithme. Au cours du processus de validation, la figure 8 affiche plusieurs trajectoires simulées d'UGV. Dans des conditions de communication optimales, le BS UGV pourrait rester stationnaire pour éviter les pertes potentielles dues aux collisions. Cependant, dans les situations où la communication n'est pas excellente, le BS UGV se déplace de manière proactive pour compenser les limitations de communication. De plus, les statistiques pour les trois indicateurs d'évaluation (Figure 5) montrent l'amélioration du retour de communication, la réduction du nombre de collisions et la diminution du nombre extérieur à mesure que l'algorithme converge. Le retour sur communication a montré une amélioration d'une valeur initiale de -800 à -300 vers la conclusion de l'expérience. Parallèlement, la fréquence des collisions a diminué de 540 à 470 et les occurrences d'événements externes de 100 à presque zéro. Cela suggère qu'à mesure que l'algorithme converge, les trois métriques d'évaluation atteignent également l'optimalité.

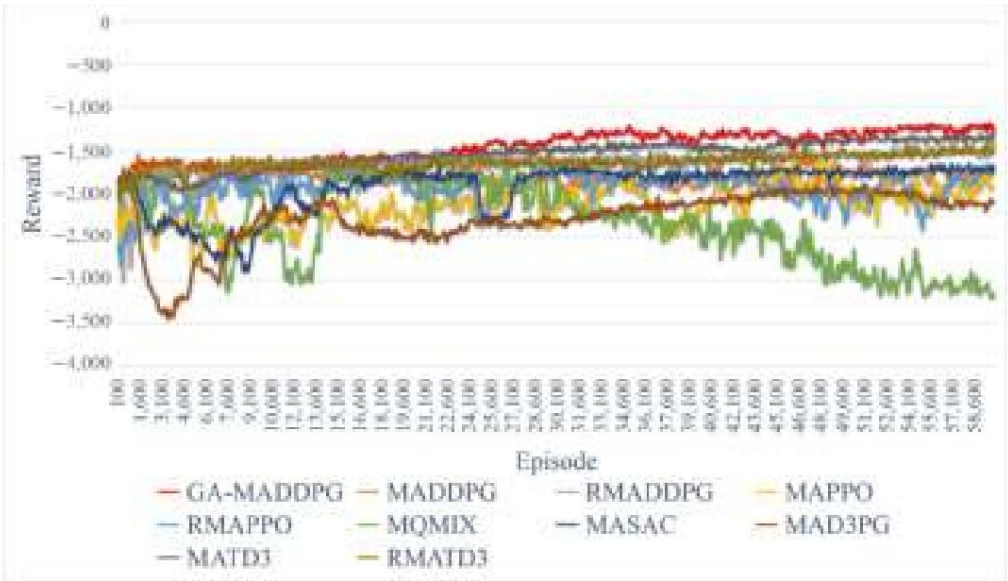


Figure 6. Coût moyen du GA-MADDPG et d'autres algorithmes avancés.

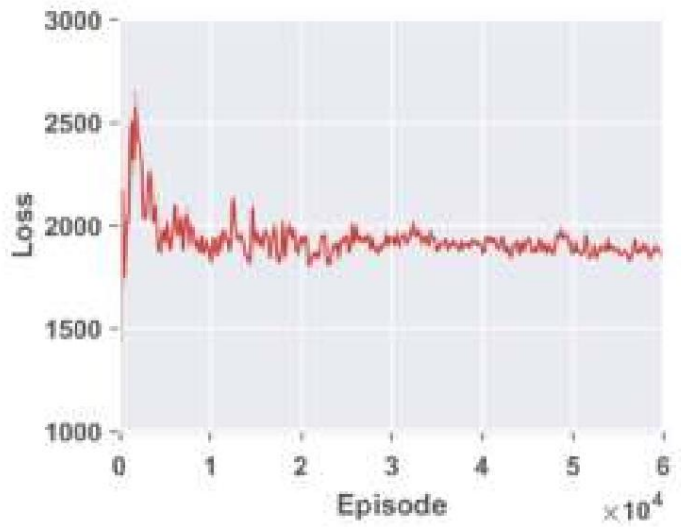
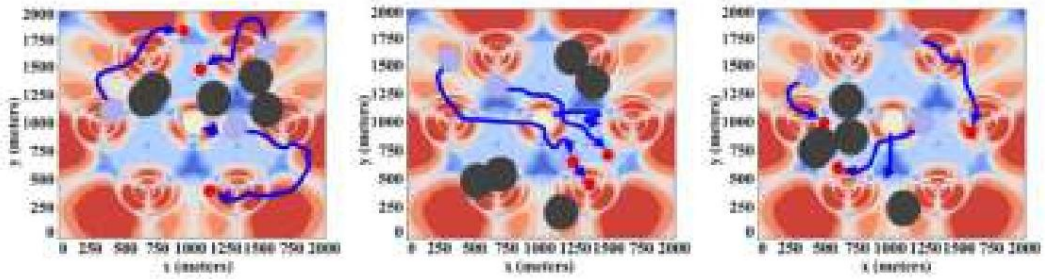


Figure 7. Evolution de la fonction de perte.

Machine Translated by Google



(un) (b) (c)

Figure 8. Quelques cartes de chemin UGV basées sur GA-MADDPG.

4.4. Expérience de généralisation de GA-MADDPG 4.4.1.
Simulation avec différents nombres d'UGV

Pour prouver davantage l'universalité de l'algorithme GA-MADDPG proposé dans l'environnement défini, cette étude a également conçu deux autres expériences de généralisation pour la scèn
L'expérience a défini différents nombres d'UGV, de points cibles et d'obstacles dans la scène pour déterminer si l'algorithme GA-MADDPG peut continuer à fonctionner de manière supérieure.
Il convient de noter que, comme certains algorithmes de base de la section 4.3 ont donné des résultats médiocres ou ont même eu du mal à converger, l'expérience de généralisation utilise quatre algorithmes de base relativement stables dans la section 4.3, notamment MASAC, MAD3PG, MADDPG et sa variante, RMADDPG. Environnement de généralisation 1 : le nombre d'UGV passe à quatre, le nombre de stations de base mobiles à un, le nombre de points cibles passe à quatre et le nombre d'obstacles passe à sept. L'intérêt d'une telle configuration de l'environnement est d'augmenter la sévérité de l'environnement en augmentant le nombre d'UGV et le nombre d'obstacles.

Sur la figure 9, nous pouvons voir que malgré la complexité accrue de l'environnement, l'algorithme GA-MADDPG a toujours une valeur de convergence plus élevée dans les environnements difficiles et peut bien converger vers une valeur élevée. L'algorithme GA-MADDPG peut maintenir la convergence jusqu'à une valeur de récompense de -3 000, tandis que les autres algorithmes de base ne fonctionnent pas bien ou ont même du mal à converger dans des environnements complexes, et la valeur de récompense la plus élevée n'est qu'environ -3 300. Cela démontre pleinement que l'algorithme GA-MADDPG a toujours de meilleures performances que les autres algorithmes même lorsque la complexité environnementale augmente.

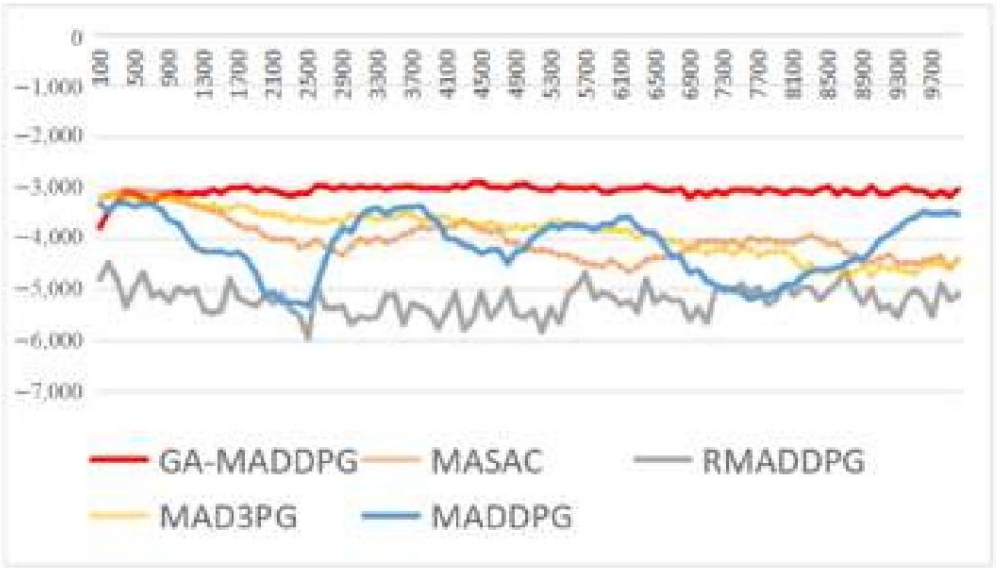


Figure 9. Comparaison des coûts moyens de l'environnement de généralisation 1.

Machine Translated by Google

Environnement généralisé 2 : Le nombre d'UGV est réduit à deux, le nombre de stations de base mobiles est réduit à un, le nombre de points cibles est réduit à deux et le nombre d'obstacles est réduit à trois. L'importance de configurer l'environnement de cette manière est d'améliorer la simplicité de l'environnement en simplifiant le nombre d'UGV et d'obstacles afin que l'UGV puisse atteindre l'objectif avec une plus grande récompense.

Comme le montre la figure 10, les récompenses de la plupart des algorithmes affichent une bonne tendance à la hausse. En effet, l'environnement généralisé utilise trois UGV plus simples (y compris une station de base UGV), trois obstacles et deux points cibles. L'algorithme fonctionne mieux dans un environnement simple et la convergence est plus facile que dans un environnement généralisé. À mesure que le nombre de véhicules diminue, le nombre de collisions et de hors limites diminue également en conséquence. Il convient de noter que puisque les paramètres de l'environnement de communication restent inchangés, la valeur de récompense de l'algorithme global est positive, ce qui est normal.

De la figure 10, on peut voir que dans cet environnement généralisé, la récompense de l' algorithme GA-MADDPG reste toujours en avance, à la fois en termes de vitesse de convergence et de valeur de convergence finale, qui sont bien supérieures à celles des autres algorithmes, et de valeur finale. la valeur de récompense peut converger vers environ 200. En tant qu'algorithme de base, MADDPG a également une valeur de convergence plus élevée d'environ 150. Cela démontre pleinement que l'algorithme GA-MADDPG peut également bien fonctionner dans un environnement simple.

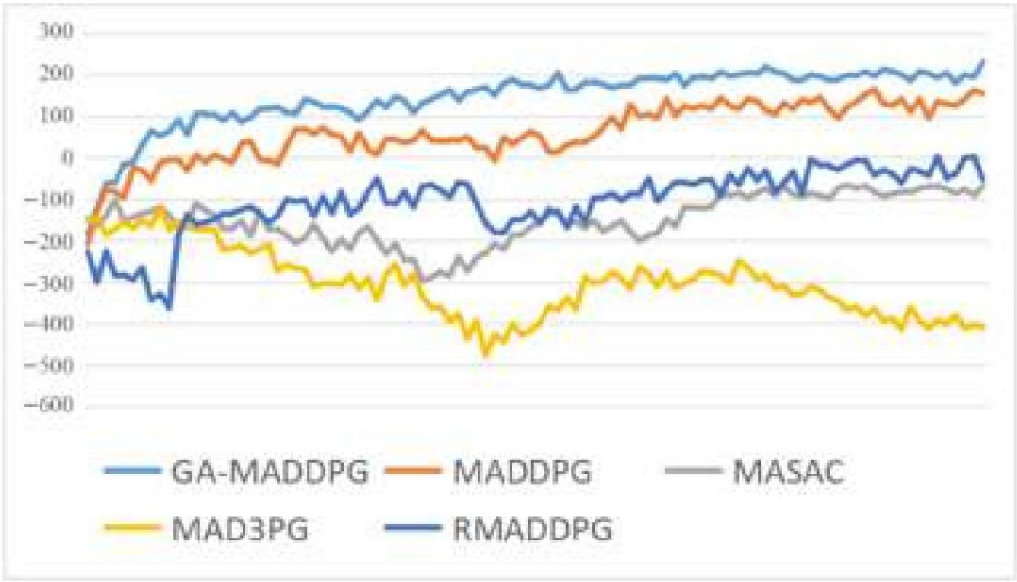


Figure 10. Comparaison des coûts moyens de l'environnement de généralisation 2.

Les figures 9 et 10 montrent que dans les environnements expérimentaux avec deux réglages de paramètres différents, malgré les changements dans le nombre d'UGV, le nombre de points cibles et le nombre d'obstacles, l'algorithme GA-MADDPG peut toujours fonctionner mieux que les autres algorithmes, ce qui démontre pleinement la robustesse de l' algorithme GA-MADDPG et son universalité aux scénarios environnementaux.

4.4.2. Expériences sur l'efficacité de la BS mobile

Les sous-sections précédentes prouvent la stabilité et la convergence de notre algorithme proposé . De plus, la dernière section prouve que notre algorithme proposé est supérieur dans le même scénario. Pour mieux démontrer l'efficacité de la station de base mobile proposée dans cet article, nous ajoutons une expérience supplémentaire : changer uniquement la BS mobile en une BS fixe mais en utilisant le même algorithme.

Nous utilisons le retour de communication comme métrique d'évaluation, et le retour de communication avec une station de base mobile est meilleur que celui de la station de base fixe dès le début de la formation, comme le montre la figure 11. Le retour de communication d'un seul UGV

Machine Translated by Google

peut éventuellement converger vers environ 300, tandis que celui de la station de base fixe oscille autour de 200 pieds, ce qui prouve pleinement l'efficacité de notre station de base mobile proposée.

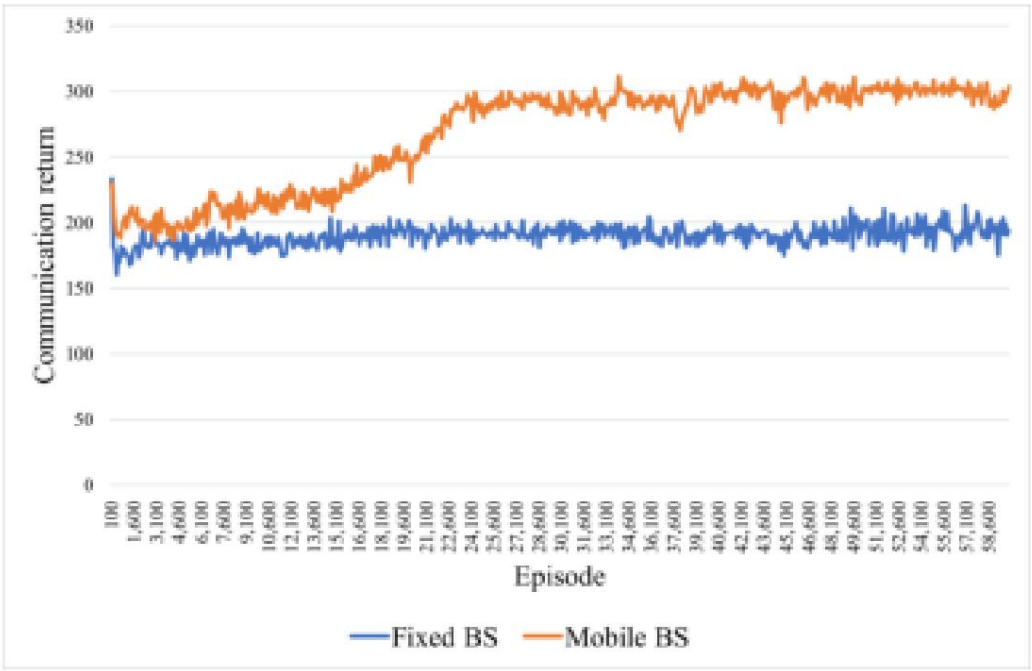


Figure 11. Comparaison des retours de communication entre BS mobile et BS fixe.

5. Conclusions

Dans cet article, un système coopératif de navigation coopérative multi-UGV au sein d'une zone de couverture de communication est proposé. Le système est formulé comme un MDP pour déterminer une politique de navigation optimale pour les UGV, dans le but de maximiser la récompense totale. Contrairement aux études antérieures axées sur la navigation sensible à la couverture fixe, cet article présente une nouvelle approche en incorporant une BS mobile dans l' algorithme à corps multi-intelligents. Cette innovation vise à améliorer la couverture de communication et à élargir l'espace de solutions disponible pour les agents intelligents. Pour atténuer le risque d'optimum local, cette étude introduit un mécanisme de mise à jour adaptative des hyperparamètres GA pour résoudre le problème de navigation multi-UGV. Nous inventons le terme GA-MADDPG pour désigner ce nouvel algorithme RL. Les résultats de la simulation démontrent que GA-MADDPG présente des performances, des taux de convergence et une efficacité favorables par rapport aux autres algo

Dans nos futures recherches, nous aimerions aborder les points suivants : (1) Pour améliorer le réalisme du modèle, on peut combiner un contrôle PID traditionnel avec un RL multi-agent et optimiser davantage la politique de navigation en prenant le contrôle du fonctionnement de la machine. (2) On peut essayer d'utiliser une nouvelle architecture pour apprendre les politiques, par exemple en utilisant le LSTM (mémoire à long terme) et l'architecture du transformateur. LSTM peut résoudre le problème de la disparition et de l'explosion du gradient lors de l'entraînement de longues séquences ; l'avantage de l' architecture du transformateur est que sa couche d'attention peut très bien apprendre une séquence d'actions.

Contributions des auteurs : Conception de la recherche, XL et MH ; acquisition de données, XL ; rédaction – préparation du projet original, XL ; rédaction – révision et édition, XL et MH ; supervision, MH; acquisition de financement , MH Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été soutenu par le projet spécial de plateforme d'innovation académicien de la province de Hainan (YSPTZX202209).

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l' article, des demandes complémentaires peuvent être adressées à l'auteur correspondant.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Machine Translated by Google

Les références

1. Afzali, SR; Shoaran, M. ; Karimian, G. Un algorithme DDPG de convergence modifié pour la manipulation robotique. Processus neuronal. Lett. 2023, 55, 11637-11652. [Référence croisée]
2. Chaise.; Niu, H. ; Carrasco, J. ; Arvin, F. ; Yin, H. ; Lennox, B. Conception et validation expérimentale de la planification et du contrôle de trajectoires rapides basés sur l'apprentissage par renforcement profond pour un robot mobile dans un environnement inconnu. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2022, 35, 5778-5792. [Référence croisée]
3. Dong, X. ; Wang, Q. ; Yu, J. ; Lu, J. ; Ren, Z. Suivi de la formation de sortie neuroadaptive pour les systèmes multiagents non linéaires hétérogènes avec plusieurs leaders non identiques. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2022, 35, 3702-3712. [Référence croisée]
4. Wang, Y. ; Zhao, C. ; Liang, J. ; Wen, M. ; Yue, Y. ; Wang, D. Localisation et planification intégrées pour le contrôle de croisière des pelotons UGV dans des environnements sans infrastructure. IEEETrans. Intell. Transp. Système. 2023, 24, 10804-10817. [Référence croisée]
5. Tran, vice-président ; Perera, A. ; Garratt, MA; Kasmarik, K. ; Anavatti, SG Planification du chemin de couverture avec des contraintes budgétaires pour plusieurs véhicules terrestres sans pilote. IEEETrans. Intell. Transp. Système. 2023, 24, 12506-12522. [Référence croisée]
6. Wu, Y. ; Li, Y. ; Li, W. ; Li, H. ; Lu, R. Schéma de localisation robuste basé sur Lidar pour véhicule terrestre sans pilote via multicapteur La fusion. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2021, 32, 5633-5643. [Référence croisée]
7. Zhang, W. ; Zuo, Z. ; Wang, Y. Systèmes multiagents en réseau : interaction antagoniste, contrainte et son application. IEEE Trans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2021, 33, 3690-3699. [Référence croisée] [Pub Med]
8. Chen, D. ; Weng, J. ; Huang, F. ; Zhou, J. ; Mao, Y. ; Liu, X. Algorithme heuristique de Monte Carlo pour les véhicules terrestres sans pilote en temps réel localisation et cartographie. IEEETrans. Véh. Technologie. 2020, 69, 10642-10655. [Référence croisée]
9. Unlu, HU ; Patel, N. ; Krishnamurthy, P. ; Khorrami, F. Système d'apprentissage en profondeur basé sur l'attention temporelle à fenêtre coulissante pour des performances robustes fusion de modalités de capteurs pour la navigation UGV. Robot IEEE. Automatique. Lett. 2019, 4, 4216-4223. [Référence croisée]
10. Lyu, X. ; Moyeu.; Wang, Z. ; Gao, D. ; Li, K. ; Chang, L. Un mécanisme intégré de tolérance aux pannes de navigation SINS/GNSS/VDM basé sur un facteur de partage d'informations adaptatif. IEEETrans. Instrument. Mesures. 2022, 71, 1-13. [Référence croisée]
11. Soleil, C. ; Oui, M. ; Hu, G. Optimisation distribuée pour deux types de systèmes multiagents hétérogènes. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2020, 32, 1314-1324. [Référence croisée]
12. Shan, Y. ; Fu, Y. ; Chen, X. ; Lin, H. ; Lin, J. ; Huang, K. Méthode d'identification des régions traversables basée sur LiDAR pour la conduite UGV hors route . IEEETrans. Intell. Véh. 2023, 9, 3544-3557. [Référence croisée]
13. Garaffa, LC; Basso, M. ; Konzen, AA; de Freitas, EP Apprentissage par renforcement pour l'exploration de la robotique mobile : une enquête. IEEETrans . Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2021, 34, 3796-3810. [Référence croisée]
14. Huang, CQ; Jiang, F. ; Huang, QH ; Wang, XZ ; Han, ZM; Huang, WY Réseau de convolution d'attention à double graphique pour la classification des nuages de points 3D . IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2022, 35, 4813-4825. [Référence croisée]
15. Nguyen, HT; Garratt, M. ; Construit; Abbass, H. Supervision d'un réseau d'acteurs profonds pour l'apprentissage par imitation dans une tâche de coordination sol-air UAV-UGV . Dans Actes de la série de symposiums IEEE 2017 sur l'intelligence computationnelle (SSCI), Honolulu, HI, États-Unis, 27 novembre-1er décembre 2017 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2017 ; p. 1 à 8.
16. Han, Z. ; Yang, Y. ; Wang, W. ; Zhou, L. ; Gadekallu, TR; Alazab, M. ; Gopé, P. ; Su, C. Conception de trajectoire basée sur une carte RSSI pour l'UGV contre la radio malveillante Source : une approche d'apprentissage par renforcement. IEEETrans. Intell. Transp. Système. 2022, 24, 4641-4650. [Référence croisée]
17. Feng, Z. ; Huang, M. ; Wu, Y. ; Wu, D. ; Cao, J. ; Korovine, I. ; Gorbatchev, S. ; Gorbacheva, N. Approximation de l'équilibre de Nash pour le jeu de Markov anti-UAV à l'aide d'un nouvel apprentissage par renforcement multi-agents déclenché par un événement. Réseau neuronal. 2023, 161, 330-342. [Référence croisée]
18. Huang, X. ; Deng, H. ; Zhang, W. ; Chanson, R. ; Li, Y. Vers une navigation multimodale basée sur la perception : un renforcement en profondeur méthode d'apprentissage. Robot IEEE. Automatique. Lett. 2021, 6, 4986-4993. [Référence croisée]
19. Wu, S. ; Xu, W. ; Wang, F. ; Li, G. ; Pan, M. Optimisation de trajectoire basée sur l'apprentissage par renforcement profond fédéré distribué pour réseaux d'urgence coopératifs air-sol. IEEETrans. Véh. Technologie. 2022, 71, 9107-9112. [Référence croisée]
20. Watkins, CJ; Dayan, P. Q-apprentissage. Mach. Apprendre. 1992, 8, 279-292. [Référence croisée]
21. Tran, TH; Nguyen, MT; Kwok, Nouveau-Mexique ; Ha, QP ; Fang, G. Approche PID en mode glissant pour un contrôle robuste de bas niveau d'un UGV. Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2006 sur la science et l'ingénierie de l'automatisation, Shanghai, Chine, 8-10 octobre 2006 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2006 ; pp. 672-677.
22. Schaul, T. ; Quan, J. ; Antonoglou, I. ; Silver, D. Relecture d'expérience prioritaire. arXiv 2015, arXiv : 1511.05952.
23. Sutton, RS; Barto, AG Apprentissage par renforcement : une introduction. IEEETrans. Réseau neuronal. 1998, 9, 1054. [Réf. croisée]
24. Lowe, R. ; Wu, YI; Tamar, A. ; Harb, J. ; Pieter Abbeel, O. ; Mordatch, I. Acteur-critique multi-agents pour une coopération mixte-compétitive environnements. arXiv 2017, arXiv : 1706.02275.
25. Mirjalili, S. ; Mirjalili, S. Algorithme génétique. Algorithmes évolutionnaires et réseaux de neurones : théorie et applications ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2019 ; p. 43-55.
26. Sehgal, A. ; La, H. ; Louis, S. ; Nguyen, H. Apprentissage par renforcement profond utilisant un algorithme génétique pour l'optimisation des paramètres. Dans les actes de la troisième conférence internationale de l'IEEE sur l'informatique robotique (IRC) 2019, Naples, Italie, 25-27 février 2019 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2019 ; pp. 596-601.
27. Chen, R. ; Yang, B. ; Li, S. ; Wang, S. Un algorithme génétique d'auto-apprentissage basé sur l'apprentissage par renforcement pour un atelier flexible problème d'horaire. Calculer. Ind. Ing. 2020, 149, 106778. [Réf. croisée]

Machine Translated by Google

28. Alipour, MM; Razavi, SN; Feizi Derakhshi, MR ; Balafar, MA Un algorithme hybride utilisant un algorithme génétique et une heuristique d'apprentissage par renforcement multiagent pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Calcul neuronal. Appl. 2018, 30, 2935-2951. [Référence croisée]
29. Liu, Z. ; Chen, B. ; Zhou, H. ; Koushik, G. ; Hébert, M. ; Zhao, D. Mapper : Planification de chemin multi-agents avec apprentissage par renforcement évolutif dans des environnements dynamiques mixtes. Dans les actes de la conférence internationale IEEE/RSJ 2020 sur les robots et systèmes intelligents (IROS), Las Vegas, NV, États-Unis, 25-29 octobre 2020 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2020 ; pp.
30. Huang, M. ; Lin, X. ; Feng, Z. ; Wu, D. ; Shi, Z. Une approche décisionnelle multi-agents pour une allocation optimale de l'énergie dans un système de micro-réseau. Electr. Système d'alimentation. Rés. 2023, 221, 109399. [Réf. croisée]
31. Qiu, C. ; Hu, Y. ; Chen, Y. ; Zeng, B. Communications sans fil à récupération d'énergie basées sur un gradient politique déterministe profond (DDPG). IEEE Internet Things J. 2019, 6, 8577-8588. [Référence croisée]
32. Littman, ML Les jeux Markov comme cadre pour l'apprentissage par renforcement multi-agents. Dans les actes du Proc International Conférence sur l'apprentissage automatique, Nouveau-Brunswick, NJ, États-Unis, 10-13 juillet 1994 ; pp. 157-163.
33. Feng, Z. ; Huang, M. ; Wu, D. ; Wu, EQ; Yuen, C. Apprentissage par renforcement multi-agents avec coupure de politique et évaluation moyenne pour le jeu de Markov de communication assistée par UAV. IEEETrans. Intell. Transp. Système. 2023, 24, 14281-14293. [Référence croisée]
34. Liu, H. ; Zong, Z. ; Li, Y. ; Jin, D. NeuroCrossover : Un schéma de sélection de locus génétique intelligent pour un algorithme génétique utilisant apprentissage par renforcement. Appl. Informatique douce. 2023, 146, 110680. [Réf. croisée]
35. Köksal Ahmed, E. ; Li, Z. ; Veeravalli, B. ; Ren, S. Algorithme génétique activé par l'apprentissage par renforcement pour la planification des autobus scolaires. J. Intell. Transp. Système. 2022, 26, 269-283. [Référence croisée]
36. Chen, Q. ; Huang, M. ; Xu, Q. ; Wang, H. ; Wang, J. Algorithme génétique basé sur l'apprentissage par renforcement pour l'optimisation multidimensionnelle système national de discrétisation des données. Mathématiques. Problème. Ing. 2020, 2020, 1698323. [Réf. croisée]
37. Yang, J. ; Soleil, Z. ; Hu, W. ; Steinmeister, L. Contrôle conjoint de la fabrication et du système de micro-réseau sur site via un nouveau réseau neuronal algorithmes d'apprentissage par renforcement intégrés. Appl. Énergie 2022, 315, 118982. [CrossRef]
38. Shi, H. ; Liu, G. ; Zhang, K. ; Zhou, Z. ; Wang, J. MARL Sim2real Transfer : Fusionner la réalité physique avec la virtualité numérique dans Métavers. IEEETrans. Système. Homme Cybern. Système. 2023, 53, 2107-2117. [Référence croisée]
39. Yu, C. ; Velu, A. ; Vinitski, E. ; Gao, J. ; Wang, Y. ; Bayen, A. ; Wu, Y. L'efficacité surprenante du ppo dans les jeux multi-agents coopératifs. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2022, 35, 24611-24624.
40. Rashid, T. ; Farquhar, G. ; Peng, B. ; Whiteson, S. Weighted qmix : Expansion de la factorisation de la fonction de valeur monotone pour les apprentissage par renforcement multi-agents. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2020, 33, 10199-10210.
41. Wu, T. ; Wang, J. ; Lu, X. ; Du, Y. Reconfiguration du réseau de distribution hybride AC/DC avec formation de micro-réseaux à l'aide d' un acteur-critique logiciel multi-agents. Appl. Énergie 2022, 307, 118189. [CrossRef]
42. Yan, C. ; Xiang, X. ; Wang, C. ; Li, F. ; Wang, X. ; Xu, X. ; Shen, L. PASCAL : MADRL basé sur un programme d'études spécifique à la population pour un flocage sans collision avec des essaims d'UAV à voilure fixe à grande échelle. Aérosp. Sci. Technologie. 2023, 133, 108091. [Réf. croisée]
43. Ackermann, JJ; Gabler, V. ; Osa, T. ; Sugiyama, M. Réduire le biais de surestimation dans les domaines multi-agents à l'aide du double Critiques centralisées. arXiv 2019, arXiv : 1910.01465.
44. Xing, X. ; Zhou, Z. ; Li, Y. ; Xiao, B. ; Xun, Y. Planification de trajectoire de formation coopérative adaptative multi-UAV basée sur un algorithme MATD3 amélioré d'apprentissage par renforcement profond. IEEETrans. Véh. Technologie. 2024. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Apprentissage automatique hybride pour l'inspection automatisée de la sécurité routière du pont du port d'Auckland

Munish Rathee 1,* , Boris Ba˘ci´c 1,* et Maryam Doborjeh 1,2

1 École d'ingénierie, d'informatique et de sciences mathématiques, Université de technologie d'Auckland, Auckland 1010, Nouvelle-Zélande ; mgholami@aut.ac.nz ou maryam.gholami.doborjeh@aut.ac.nz
2 Ingénierie des connaissances et innovation en recherche et découverte, Université de technologie d'Auckland, Auckland 1010, Nouvelle-Zélande

* Correspondance : munishonthenet@gmail.com ou munish.rathee@aut.ac.nz (MR) ; boris.bacic@aut.ac.nz (BB)

Résumé : Le pont du port d'Auckland (AHB) utilise une barrière mobile en béton (MCB) pour réguler le flux bidirectionnel irrégulier du trafic quotidien. En plus du risque d'erreur humaine lors des inspections visuelles régulières, les membres du personnel inspectant le MCB travaillent dans diverses conditions météorologiques et de luminosité, s'exerçant dans des postures d'inspection ergonomiquement malsaines avec le poids supplémentaire d'équipements de protection pour atténuer les risques, par exemple des débris volants. Pour augmenter les inspections visuelles d'un MCB à l'aide de la technologie de vision par ordinateur, cette étude présente une solution hybride d'apprentissage en profondeur qui combine la manipulation du noyau avec des stratégies d'apprentissage par transfert personnalisées. Les enregistrements de données vidéo ont été capturés dans diverses conditions d'éclairage et météorologiques (sous la supervision de sécurité d' experts de l'industrie) impliquant un système de caméra à grande vitesse (120 ips) fixé à un véhicule de transfert MCB. Avant d'identifier un risque pour la sécurité, par exemple la position dangereuse d'une broche reliant deux segments de béton de 750 kg du MCB, un prétraitement en plusieurs étapes de la région spatio-temporelle d'intérêt (ROI) implique une fenêtre déroulante avant d'identifier les images vidéo contenant des informations de diagnostic. . Cette étude utilise l'architecture ResNet-50, améliorée par des convolutions 3D, dans le cadre STENet pour capturer et analyser des données spatio-temporelles, facilitant ainsi la surveillance en temps réel du pont du port d'Auckland (AHB). Compte tenu de la nature rare des anomalies de sécurité, les résultats initiaux de classification binaire évalués par des pairs (82,6 %) pour les scénarios sûrs et dangereux (intervention requise) ont été améliorés à 93,6 % en incorporant des données synthétiques, des commentaires d'experts et un recyclage du modèle. Cette adaptation a permis une détection optimisée des faux positifs et des faux négatifs. À l'avenir, nous visons à étendre les méthodes de détection des anomalies à diverses inspections d'infrastructures, améliorant ainsi la résilience urbaine, l'efficacité et la sécurité des transports.

Mots clés : détection d'anomalies ; détection des dommages structurels ; sécurité routière; vision par ordinateur; apprentissage automatique ; l'apprentissage en profondeur; apprentissage par transfert ; ARDAD

check for updates

Citation : Rathee, M. ; Ba˘ci´c, B. ; Doborjeh, M. Apprentissage automatique hybride pour l'inspection automatisée de la sécurité routière du pont du port d'Auckland. Électronique 2024, 13, 3030. https://doi.org/10.3390/électronique13153030

Rédacteurs académiques : Jiwei Zhang et Shaozhang Niu

Reçu : 15 juin 2024
Révisé : 24 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Le pont du port d'Auckland, qui s'étend sur 1,2 km au-dessus du port de Waitemata, a été inauguré le 30 mai 1959. Initialement traitant 11 205 véhicules par jour, le pont accueille actuellement environ 154 000 véhicules par jour, avec des pics de plus de 200 000 dus aux changements de transports publics [1]. Le pont soutient un développement régional rapide, avec une population de la Côte-Nord quadruplée au cours des 50 dernières années. La New Zealand Transport Authority (NZTA), également connue sous le nom de Waka Kotahi, investit chaque année jusqu'à 4 millions NZD dans sa maintenance et emploie environ 160 personnes pour les mises à niveau et la maintenance continues. Comme toutes les infrastructures de transport cruciales en Nouvelle-Zélande, le pont du port d'Auckland (AHB) est confronté à d'importants défis de maintenance en raison de facteurs environnementaux et externes. Ces défis contribuent aux coûts globaux élevés d'entretien des infrastructures routières du pays, qui représentent jusqu'à 1,1 % du PIB de la Nouvelle-Zélande [2].

Ce document est organisé comme suit:

Machine Translated by Google

La section 1 présente un aperçu du problème et de la question de recherche ; La section 2 comprend une revue complète de la littérature sur la détection automatisée des défauts et des anomalies des routes ; et la section 3 propose une nouvelle méthodologie basée sur une solution hybride d'apprentissage profond pour augmenter les inspections visuelles à l'aide de la technologie de vision par ordinateur.

1.1. Arrière-plan

Installée en 1990, la barrière mobile en béton (MCB) sur l'AHB a amélioré la fluidité et la sécurité du trafic aux heures de pointe. Chaque jour de la semaine, l'AHB utilise deux machines de transfert de barrières (BTM) pour ajuster la configuration des voies, améliorant ainsi la fluidité du trafic pendant les heures de pointe en déplaçant des blocs de béton de 750 kg. Les BTM, essentiels à la gestion des marées quotidiennes, ont été introduits en 2009 pour 1,4 million NZD chacun. Malgré le coût élevé, les BTM ne disposent pas de système de surveillance automatisé pour garantir l'intégrité des barrières mobiles en béton (MCB). En l'absence d'un système d'inspection de sécurité des barrières MCB, le personnel de la NZTA doit parcourir plus d'un mile dans des conditions dangereuses et au milieu d'un trafic dangereux pour inspecter manuellement et garantir l'intégrité du MCB [3].

La fiabilité du système MCB dépend de l'intégrité des broches métalliques reliant les segments de barrière (Figure 1). La fonction essentielle des épingles est de sécuriser les segments de barrière qui régulent la division des voies en fonction du flux de circulation [3]. Des axes défectueux ou délogés présentent des risques pour la sécurité routière et nuisent à l'efficacité du système, entraînant ainsi des perturbations potentielles de la circulation et une augmentation des risques d'accident.

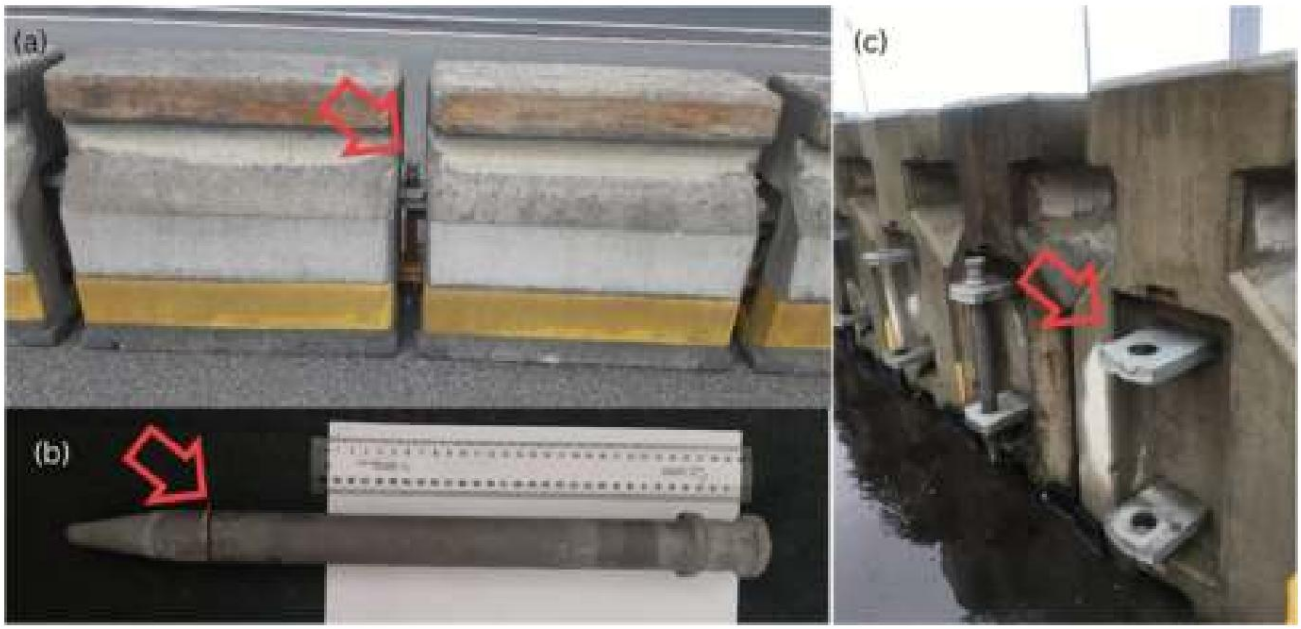


Figure 1. Un système de barrière mobile en béton et ses défis en matière de sécurité. (a) Position de la goupille nécessitant une fixation, (b) goupille métallique avec anneau de sécurité amovible, et (c) joints de barrière en béton mobiles sans goupilles métalliques.

Les travaux antérieurs en matière d'inspection automatisée des infrastructures échouent souvent dans des environnements dynamiques et complexes comme l'AHB [4–6]. Cette recherche vise à faire progresser le domaine en intégrant un nouvel hybride d'apprentissage profond et d'analyse de données spatio-temporelles, permettant une détection plus précise et plus fiable des anomalies de sécurité dans des environnements complexes tels que l'AHB. Cette étude utilise l'analyse spatio-temporelle, des algorithmes d'IA déployables et la génération de données synthétiques semi-automatisées pour améliorer la surveillance des barrières de circulation, transformant la recherche en solutions pratiques de détection d'anomalies en temps réel. L'objectif est de réduire les risques liés aux inspections manuelles, d'améliorer la sécurité routière (Figure 2) et d'augmenter l'efficacité des systèmes de barrières. S'appuyant sur la preuve de concept développée en 2019-2020 [7], cette recherche utilise des techniques de vision par ordinateur et d'apprentissage profond pour au-

Machine Translated by Google

Tomate la détection de broches métalliques dans les barrières mobiles en béton (MCB) sur le pont Harbour Bridge d'Auckland (AHB).



Figure 2. L'ampleur des défis liés à l'inspection manuelle et à la fixation de la goupille métallique : (a) divers emplacements de barrières en béton mobiles sur et autour du pont du port d'Auckland ; (b) trouver une goupille dangereuse et la réparer manuellement.

Les modèles hybrides d'apprentissage automatique, qui intègrent les CNN à d'autres techniques d'apprentissage automatique , peuvent révolutionner les inspections en améliorant la précision et la fiabilité de la détection et de la classification des conditions anormales [8,9]. Les modèles d'apprentissage profond formés par sur l'ensemble de données synthétiquement amélioré utilisent une approche de détection basée sur les fonctionnalités pour analyser les images vidéo à la recherche de signes de déplacement des broches. La capacité de surveillance en temps réel est cruciale pour une gestion efficace du trafic, en particulier aux heures de pointe. Des alertes immédiates adressées aux opérateurs de pont facilitent les interventions en temps opportun, empêchant ainsi les problèmes de sécurité potentiels de dégénérer en incidents plus graves. Le développement d'un tel système de surveillance automatisé fait progresser le génie civil et la sécurité routière, offrant une solution évolutive et efficace à un défi de sécurité de longue date et créant un précédent pour des applications similaires dans le monde entier, conduisant potentiellement à une adoption plus large de solutions intelligentes de gestion du trafic dans les contextes urbains mondiaux [10].

Cette étude a développé un système hybride d'apprentissage automatique pour la détection d'anomalies en temps réel et préservant la confidentialité lors des inspections de sécurité routière. Les contributions de cette recherche sont répertoriées comme suit :

- Produit un artefact d'analyse de la sécurité routière évolutif à des scénarios dans plus de 20 pays et des centaines de scènes de trafic similaires [10] qui utilisent des barrières mobiles en béton.
- Présente une méthode de génération de données synthétiques semi-automatique utilisant une nouvelle technique de clonage en arrière-plan. La nouvelle approche aborde la rareté des données et améliore la formation des modèles, avec une valeur de répétabilité pour d'autres études de cas de vision par ordinateur confrontées à des problèmes d'équilibrage des ensembles de données.
- Affine les méthodes de classification pour équilibrer les faux positifs et les négatifs, améliorant ainsi la précision de détection de 82,6 % (rapporté dans des recherches antérieures évaluées par des pairs [11]) à 93,6 %.

L'obtention de cette augmentation de 11 % de la précision dans des scènes de circulation complexes caractérisées par des arrière-plans et des conditions d'éclairage chaotiques souligne la viabilité de l'artefact pour des applications du monde réel.
- Navigue avec succès dans les scènes de circulation dangereuses pour la collecte de données en adhérant aux protocoles de sécurité de l'industrie. Cette approche reproductible fournit un modèle complet pour gérer des scénarios similaires, garantissant la satisfaction des parties prenantes et obtenant suffisamment de données.

Machine Translated by Google

1.2. Questions de recherche et concepts de modélisation

Cet article présente le développement de solutions automatisées tirant parti de la vision par ordinateur et de l'apprentissage profond pour améliorer la sécurité routière et l'efficacité opérationnelle en automatisant l'inspection des broches métalliques dans les barrières mobiles en béton. Cette recherche explore le potentiel des capteurs visuels à détecter les anomalies des activités de transport tout en préservant la confidentialité. Axées sur la barrière mobile du pont du port d'Auckland, nos recherches automatisent le contrôle de sécurité et améliorent la détection des anomalies pour les classes critiques mais sous-représentées comme les positions dangereuses des broches. En outre, les techniques de classification ont été affinées pour équilibrer les faux positifs et négatifs, améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité du système de sécurité routière.

1. Les informations pertinentes des capteurs visuels peuvent-elles être extraites pour la détection d'anomalies dans activité de transport tout en préservant l'intimité ? a) Quelles sont les méthodes optimales pour extraire des informations vitales des médias visuels afin de détecter les anomalies liées aux activités de transport sans compromettre la confidentialité ?
   (b) Dans quelle mesure le contrôle de sécurité de la barrière mobile du pont du port d'Auckland et de ses environs peut-il être automatisé à l'aide des méthodes IA, CV et DL ?
2. Comment rationaliser la génération de données synthétiques pour représenter les classes minoritaires, telles que les positions dangereuses des broches, dans les tâches de détection d'anomalies en matière de sécurité routière ?
3. Comment les performances de classification peuvent-elles être perfectionnées pour optimiser un équilibre entre les faux positifs et les négatifs de la première preuve de concept (PoC) [7] tout en considérant les scénarios de données actuels et anticipés ?

2. Revue de la littérature

La détection automatisée des défauts et des anomalies routières (ARDAD) utilise la vision par ordinateur, combinant des méthodes d'apprentissage traditionnelles et profondes avec un apprentissage non supervisé [12,13].
Les méthodes traditionnelles non supervisées, reposant sur des ensembles de données de conditions normales, produisent souvent des taux de fausses alarmes élevés dans des environnements complexes [14].
Cette recherche utilise le réseau spatio-temporel amélioré (STENet) pour résoudre le problème des scènes de trafic complexes, qui exploite les données temporelles et spatiales pour une meilleure généralisation et une détection robuste des anomalies.

2.1. Pont du port d'Auckland

L'Agence néo-zélandaise des transports (NZTA) gère l'Auckland Harbour Bridge (AHB), une autoroute à huit voies supportant plus de 200 000 véhicules par jour. Installée dans les années 1990, la barrière de voie mobile en béton (MCB) est essentielle pour prévenir les accidents et optimiser la fluidité du trafic aux heures de pointe. Le système MCB, composé de blocs de béton de 750 kg reliés par des broches métalliques, est sujet aux déplacements dus au trafic et aux vibrations ambiantes, posant des risques importants [1,3,15]. Les machines de transfert à barrière (BTM) facilitent le mouvement du MCB, ajustant généralement les voies quatre fois par jour pour gérer efficacement la circulation.

L'inspection manuelle des broches demande beaucoup de main d'œuvre et s'effectue dans de mauvaises conditions ergonomiques, ce qui la rend susceptible aux erreurs humaines. Malgré l'efficacité du système à modifier rapidement les voies de circulation (environ 10 minutes pour une section d'un kilomètre), l'absence de mécanismes automatisés d'inspection des broches au sein des BTM existants, d'un montant de 1,4 million de NZD, peut être considérée aujourd'hui comme un oubli important et une opportunité d'appliquer le CV. dans les protocoles de maintenance et de sécurité [1,15,16]. Bien qu'efficace dans la gestion des voies à contre-courant et des voies à forte occupation, le système de barrière mobile en béton (MCB) nécessite une surveillance manuelle continue pour garantir son intégrité structurelle et sa fiabilité opérationnelle.

2.2. Revue des enquêtes sur l'ARDAD

L'application de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage profond à la détection d'anomalies des infrastructures routières et d'objets a réalisé des percées significatives au cours de la dernière décennie [5,12,13]. Les progrès de l'IA ont eu un impact sur des domaines tels que la conduite autonom

Machine Translated by Google

reconnaissance faciale et soins de santé personnalisés [17,18]. Les techniques d'apprentissage profond, en particulier les réseaux de neurones convolutifs (CNN), ont révolutionné le traitement des images en automatisant les tâches de segmentation, de reconnaissance et de reconstruction [6]. Les CNN traitent et classifient efficacement les données d'image par regroupement et convolution, extrayant des caractéristiques et réduisant la dimensionnalité [19-22]. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui s'appuient sur des fonctionnalités conçues à la main , les modèles d'apprentissage profond apprennent les représentations des fonctionnalités directement à partir des données. Des architectures comme R-CNN et ses variantes excellent dans la détection d'objets en utilisant des méthodes de proposition de région pour des zones d'intérêt présélectionnées [23].

De plus, l'apprentissage par transfert améliore la généralisabilité des modèles en appliquant des modèles formés sur une tâche à des tâches liées mais différentes [24]. L'apprentissage par transfert exploite des modèles pré-entraînés pour améliorer les performances sur de nouveaux ensembles de données, souvent en affinant les couches finales des réseaux comme ResNet-50, qui a démontré un succès remarquable dans le cadre du Visual Recognition Challenge [25]. L'approche souligne la polyvalence et la capacité d'adaptation des modèles d'apprentissage profond dans la gestion d'environnements de données visuelles divers et complexes.

2.3. Techniques d'optimisation de vidéo et d'image dans ARDAD La

sélection d'un espace colorimétrique approprié dans la segmentation d'image est cruciale et souvent spécifique à l'application, sans consensus sur le meilleur choix. Les espaces colorimétriques courants incluent RVB, LAB, CMY, XYZ, HSV, YCbCr, YIQ, YUV et DHT [26,27]. Par exemple, RVB est efficace pour les changements de concentration de bilirubine (équation (1)), tandis que CMY et HSV excellent dans d'autres tâches (28). Des méthodes avancées telles que les histogrammes unidimensionnels pour la sélection automatique de l'espace colorimétrique [29] et les histogrammes bidimensionnels pour une segmentation améliorée [30] ont été développées pour optimiser le processus. Des applications spécifiques, telles que YCbCr pour la détection des visages [31] et YIQ pour l'imagerie satellite [32], démontrent des approches sur mesure. Pour la surveillance du pont du port d'Auckland (AHB), la composante Y (équation (1)) de la transformation RVB en YCbCr peut améliorer la détection des anomalies structurelles en se concentrant sur la luminance et en minimisant les variations de couleur dues à l'éclairage ou aux conditions météorologiques.

$$Y = 0{,}299R + 0{,}587G + 0{,}114B \quad (1)$$

Des techniques telles que le seuillage d'histogramme et le clustering basé sur SVM ont également été appliquées pour améliorer la segmentation en structurant les données de pixels en groupes de couleurs cohérents [33,34].

2.4. Techniques avancées d'analyse vidéo et d'image pour ARDAD En

vision par ordinateur, la détection d'objets dans les vidéos implique la reconnaissance du mouvement des objets sur plusieurs images, en utilisant des techniques telles que la soustraction d'arrière-plan, la différenciation d'images et le flux optique. Le modèle de mélange gaussien (GMM) est une méthode répandue pour la séparation de l'arrière-plan, améliorant la distinction entre le premier plan et l'arrière-plan en modélisant les distributions de pixels avec des mélanges gaussiens [35-37]. La correspondance de modèles, une autre approche pratique , utilise des fonctions MATLAB 2022a comme normxcorr2 et regionprops pour suivre les objets dans des images successives en identifiant le pic de corrélation croisée normalisée [38]. La correspondance de modèle , représentée par l'équation (2), calcule le centroïde pondéré en intensité d'un objet à l'aide de l'expression suivante :

$$xc = \frac{\sum_{i=1}^{N} xi \cdot wi}{\sum_{je=1}^{N} wi} \quad (2)$$

où xc est l'emplacement du centroïde, xi est l'emplacement du pixel et wi est l'intensité du pixel.
La multiplication de xi par wi au numérateur garantit que l'emplacement de chaque pixel est pondéré par son intensité, donnant plus d'importance aux pixels ayant des intensités plus élevées dans le calcul du centroïde.

Les techniques de séparation avant-plan-arrière-plan divisent une vidéo en arrière-plans statiques et avant-plans dynamiques, en utilisant des modèles qui s'adaptent aux changements de la scène pour détecter le mouvement et reconnaître les objets [39,40]. Les progrès récents du GMM ont introduit des méthodes qui gèrent des scènes complexes comme la circulation, améliorant ainsi la détection des véhicules lents.

Machine Translated by Google

ou des véhicules surdimensionnés [41]. Chaque pixel de la séquence vidéo est modélisé comme un mélange de K distributions gaussiennes. La probabilité d'observer une valeur de pixel X au temps t est donnée par l'équation (3).

$$P(Xt) = \sum_{k=1}^{K} \omega\, k,t \cdot N\, Xt\, \mu k,t,\, \Sigma k,t \quad (3)$$

Ici, ω k,t est le poids du k ème Composante gaussienne au temps t, N est la distribution gaussienne, μk,t est la moyenne de la k ème gaussienne et ∑k,t est la matrice de covariance de la k-ème gaussienne. D'autre part, les méthodes de différence d'image détectent le mouvement en comparant les différences de pixels d'une image à l'autre, une technique simple mais efficace pour identifier des objets en mouvement [42]. Les techniques de flux optique évaluent le mouvement en analysant le modèle de mouvement apparent des objets, des surfaces et des bords dans une scène visuelle provoqué par le mouvement relatif entre un observateur et la scène [43]. Par exemple, l'équation (4) synthétise la détection de mouvement à l'aide des différences de trame | Ft −Ft −1 | pour identifier les changements et le flux optique, représentés par It · vt , pour analyser les modèles de mouvement et les vitesses, avec α ajustant leurs contributions relatives.

$$\Delta Mt = | Ft - Ft - 1 | + \alpha \cdot It \cdot vt \quad (4)$$

Le suivi d'objets en vision par ordinateur suit la détection d'objets, en utilisant la couleur, la texture, la forme, la taille et l'orientation pour suivre des objets tels que des véhicules ou des piétons à travers des images vidéo. Un suivi robuste est essentiel quel que soit l'emplacement des caméras, les conditions d'éclairage et les scènes encombrées [44]. Des techniques telles que le filtre de Kalman et le filtre à particules sont standards pour suivre les mouvements linéaires et non linéaires [45]. L'analyse Blob suit les objets dans des images binarisées en fonction de caractéristiques telles que les dimensions de la zone et du cadre de délimitation [46]. Le modèle de filtre Bayer calcule la distance entre les centres de gravité des objets, facilitant ainsi le suivi et la mesure de la vitesse du véhicule.
Le filtre de Kalman affine les prédictions de trajectoire en combinant les emplacements prédits et réels [47,48]. Pour les scénarios non linéaires, le filtre de Kalman étendu utilise la matrice jacobienne pour les matrices de transition (équation (5)).

$$\hat{x}k|k = \hat{x}k|k-1 + Kk\, zk - Hk\hat{x}k|k-1 \quad (5)$$

Dans l'équation (5), x^k|k est l'estimation d'état mise à jour au temps k ; x^k|k−1 est l'estimation de l'état prédit au temps k, basée sur l'estimation à partir du temps k −1 ; Kk est le gain de Kalman, qui dicte le mélange de la prédiction et de l'observation ; zk est la mesure réelle au temps k ; et Hk est la matrice de mesure qui mappe l'espace d'état dans l'espace de mesure.

Le filtre à particules améliore le suivi dans des scénarios complexes en échantillonnant et en rééchantillonnant les caractéristiques des objets à travers les images, se révélant plus efficace dans des environnements non linéaires et encombrés que d'autres méthodes [49,50]. Il utilise un filtre à particules de corrélation pour gérer les variations d'échelle et les interdépendances des fonctionnalités.

L'algorithme de décalage moyen, qui utilise un modèle de couleur statistique pour le suivi, converge de manière itérative vers des zones à haute densité dans la connectivité à 8 points de l'espace colorimétrique pour localiser les objets [51]. Le modèle de mouvement local adaptatif (ALMM) aborde le mouvement en se concentrant sur des zones régionales plutôt que sur l'objet dans son ensemble, s'avérant efficace contre les occlusions et les mouvements rapides (52).

La collecte de données et l'étiquetage manuel dans les systèmes ARDAD peuvent nécessiter beaucoup de ressources et de temps. Bien que les approches d'apprentissage profond offrent des avantages significatifs dans le traitement d'images et de vidéos en raison de leur capacité à surpasser les méthodes traditionnelles, elles nécessitent des ensembles de données et une puissance de calcul importants [53]. Alternativement, l'extraction de fonctionnalités pilotée par des experts avec des approches traditionnelles d'apprentissage automatique (ML) peut être efficace avec des ensembles de données plus petits et une moindre demande de calcul, ce qui les rend adaptées aux conceptions initiales de systèmes cibles [54]. Les modèles d'apprentissage profond pré-entraînés facilitent l'extraction automatique des fonctionnalités et permettent l'apprentissage par transfert, qui adapte les modèles à de nouvelles fonctions sans ressources de calcul étendues [55] et sans oubli catastrophique. La fusion de l'apprentissage par transfert avec l'apprentissage automatique traditionnel améliore la classification spatio-temporelle en tirant parti de modèles pré-entraînés pour une extraction efficace des caractéristiques et en appliquant des modèles traditionnels pour l'analyse de séquence, offrant ainsi une opportunité d'améliorer la précision de la c

Machine Translated by Google

La combinaison de l'apprentissage profond avec l'apprentissage automatique traditionnel a été appliquée dans divers domaines, tels que la prévision des flux de trafic et la surveillance de la santé des cultures [56,57].

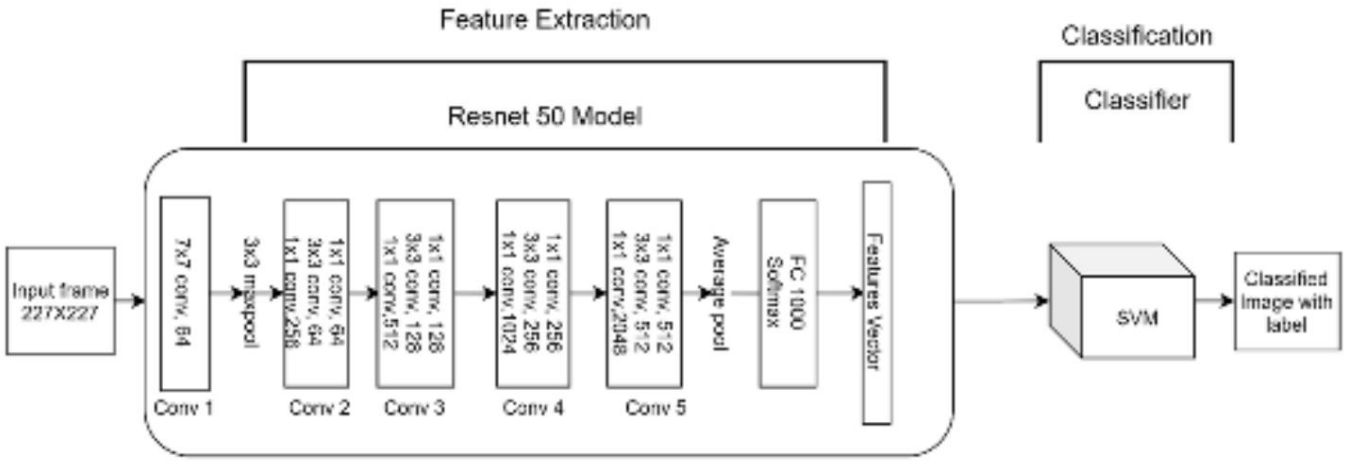


Figure 3. Intégration de l'apprentissage par transfert avec le ML traditionnel : ResNet 50 extrait les fonctionnalités des images d'entrée, qu'un SVM classe. L'intégration des capacités d'apprentissage profond de ResNet 50 pour générer un espace de fonctionnalités sans s'appuyer sur des connaissances expertes combinées à un classificateur traditionnel (par exemple, SVM) présente l'opportunité d'améliorer les performances de classification des images.

La fusion de l'apprentissage par transfert avec l'apprentissage automatique traditionnel (Figure 3) pour les tâches de classification spatio-temporelle vise à remplacer la fonction softmax() (6), qui est couramment utilisée comme dernière couche d'un réseau neuronal pour convertir des caractéristiques de grande dimension. vecteurs (R) généralement en une probabilité de résultats possibles, c'est-à-dire normalisée pour la distribution de classe de sortie prévue.

$$\hat{y} = \text{softmax}(W_{ff}(X) + b) \quad \hat{y} = \text{softmax}(W_{fRNN}(f_{CNN}(X)) + b) \tag{6}$$

où la fonction de perte utilisée dans l'apprentissage par transfert est

$$L(\theta) = \ell(y, f(X; \theta)) \quad L(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ell(y_i, f(X_i; \theta)) \tag{7}$$

Ici, L(θ) est la perte moyenne sur N échantillons d'entraînement, Xi et yi sont l'échantillon d'entrée et d'étiquette, f pour le je est le modèle avec les paramètres θ initialisés à partir d'un modèle pré-entraîné, et ℓ est la fonction de perte, telle que la fonction de perte croisée. perte d'entropie pour la classification. Dans les applications pratiques, une telle approche hybride améliore l'efficacité et la précision des modèles spatio-temporels dans les applications pratiques [56,57].

Les principales considérations du point de vue de la méthodologie du projet incluent la disponibilité et l'équilibre des ensembles de données, les limitations informatiques des plates-formes cibles prévues et l' intégration des techniques de ML traditionnelles pour une meilleure compréhension des données. Les méthodologies adoptées englobent l'apprentissage par transfert pour une détection et une classification améliorées des objets, l'exploitation de l'apprentissage profond pour la génération de fonctionnalités et l'utilisation de classificateurs ML traditionnels pour extraire des informations supplémentaires, garantissant ainsi une approche globale du développement de solutions ARDAD.

3. Matériels et méthodes

Cet article documente une phase critique du processus de développement, la transition de la preuve de concept (PoC) initiale [7] à un produit minimum viable (MVP) pour la barrière mobile en béton (MCB) du pont du port d'Auckland, abordant d'autres problèmes de recherche. liés à la détection d'anomalies dans un scénario spatio-temporel bruyant.

Pour relever les défis du monde réel et produire des solutions technologiques, la méthodologie de recherche a dû être considérablement adaptée pour respecter les règles de sécurité de la NZTA Waka Kotahi associées à l'enregistrement de vidéos montrant des épingles délibérément placées dans des températures.

Machine Translated by Google

positions potentiellement dangereuses (sur les courts segments de barrière situés sur la zone de travail sécurisée avant le Harbour Bridge). L'équipement de collecte de données est attaché en toute sécurité à un BTM à l'aide d'engins de fortune (Figure 4 et Tableau 1). Cependant, l'exploitation de plusieurs opérations de machine de transfert de barrière (BTM) pour collecter des données clairsemées sur les classes minoritaires n'était pas viable, ce qui a conduit au développement d'une approche de clonage en arrière-plan pour produire des images synthétiques illustrant les positions des broches dangereuses (Tableau 2). Une telle approche méthodologique est alignée sur la résolution de problèmes multidimensionnels pour les projets où une adaptation continue aux facteurs externes est nécessaire [58,59].



Figure 4. Configuration de la collecte de données : iPhone 13 Pro (pour LiDAR), Samsung A7 Mobile, Apple iPad 6, banque d'alimentation externe, caméras GoPro et équipement de montage, et montage de caméra et d'iPhone sur un BTM.

Tableau 1. Aperçu de la collecte de données. Équipement, spécifications de la caméra, conditions météorologiques, défis rencontrés et progression des progrès technologiques au cours de trois sessions de collecte de données.

Session Non.	Équipement	Spécifications de la caméra	Météo Conditions	Défis	Technologie. L'intégration
1er	GoPro 8, GoPro 5, Samsung A7 Mobile, Apple iPad 6, ruban adhésif, batterie externe et bandes de montage sur le BTM. Machine de transfert de barrière (BTM) utilisée pour maintenir des angles de caméra optimaux pendant les sessions d'enregistrement	Résolution : 720p, Fréquence d'images : 240 ips, Champ de vision : étroit, Audio : vent uniquement, Protune : activé, Balance des blancs : automatique, Couleur : Plat, Obturateur : Automatique, limite ISO : 6 400, Netteté : élevée, Protune audio : Moyen, Rotation automatique : Auto	Pluie occasionnelle et ciel couvert	les vibrations, Chauffage de caméra, Montage Contrôles d'intégrité	Session initiale : travaux préparatoires pour la collecte de données incrémentielle
2ème	GoPro 8 et 5 sur les bras avant et arrière du BTM, autres équipements identiques au premier	Idem à la première séance spécifications	Ensoleillé	Chauffage de caméra, Imperméabilisation, Batterie Autonomie à Cadre haut Les taux	La séance s'est concentrée sur des conditions d'éclairage ensoleillées et idéales

Machine Translated by Google

Tableau 1. Suite

Séance n°	Équipement	Spécifications de la caméra	Météo Conditions	Défis	Technologie. L'intégration
3ème	GoPro 9 et iPhone 13 Pro en mallette rigide avec application 3D de nuage de points sur le bras avant du BTM, GPS activé sur les deux appareils. iPhone 13 Pro utilisé avec une application spécialisée pour créer des données de nuages de points 3D, améliorant ainsi la profondeur et la qualité de l'analyse spatiale	GoPro 9 : résolution 1080p, 240 ips, Spécifications améliorées pour les conditions difficiles iPhone 13 Pro : Caméra compatible Lidar pour la capture de données de nuages de points 3D et GPS pour le suivi de localisation	Tôt le matin, sombre et pluvieux	Assurer la caméra Imperméabilisation, Maintenir Batterie Autonomie, Stabilité de l'appareil dans des conditions difficiles Conditions	Intégration du Lidar et GPS pour avancé capture de données spatiales ; utilisé la 5G en temps réel transmission de données. Utiliser de la technologie 5G a été considérée comme améliorant capture et transmission de données en temps réel, garantissant que de grands ensembles de données peuvent être gérés efficacement

3.1. Étape 1 : Collecte de données et génération de données synthétiques

La collecte de données progressives a commencé dès la première session, sous des pluies occasionnelles et dans des conditions nuageuses, créant ainsi un précédent en matière de résilience du processus. Au cours de la deuxième session, réalisée par temps ensoleillé, deux caméras GoPro ont été montées sur les bras de la Barrier Transfer Machine (BTM), avec des défis techniques tels que les vibrations, la surchauffe de la caméra, la nécessité d'une étanchéité et le maintien de la durée de vie de la batterie à des fréquences d'images élevées. devenant apparent. La troisième session s'est déroulée sous de fortes pluies, ce qui a donné lieu à de nouvelles améliorations du protocole et de la conception du système. Parallèlement, l'intégration de technologies avancées telles que les réseaux Lidar, GPS et 5G a été considérée comme augmentant la robustesse et la capacité des cycles de collecte de données (Tableau 1).

Les inspections manuelles préventives des barrières mobiles en béton (MCB) avant toute opération BTM pour modification de voie ont éliminé la possibilité de capturer naturellement les positions dangereuses des broches requises (Figure 5). Cette mesure de précaution est compréhensible compte tenu du risque important que représentent les blocs de béton potentiellement lâches lors du processus de transfert du MCB, ce qui pourrait compromettre l'intégrité du BTM et la sécurité des usagers de la route.

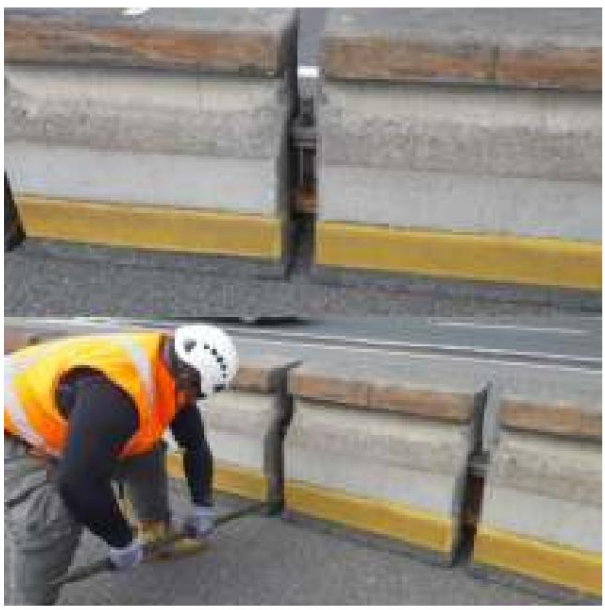


Figure 5. Épingle déplacée manuellement par le personnel de la NZTA à la demande de l'auteur. Le prff

Figure 5. Épingle déplacée manuellement par le personnel de la NZTA à la demande de l'auteur. Le processus était difficile et laborieux, et le membre du personnel avait besoin de plusieurs minutes par broche pour effectuer les ajustements. Remarque : Une telle option n'était pas viable car elle ne représente pas l'environnement naturel du retour sur investissement dans lequel les problèmes du monde réel doivent être résolus.

Machine Translated by Google

Tableau 2. Processus semi-automatisé pour générer un ensemble de données diversifiées de positions de broches synthétiques (basé sur la méthode de clonage manuel illustrée à la figure 6).

Algorithme : génération d'images synthétiques semi-automatiques pour la position des broches
Entrée : série d'images Pin_OK, image de modèle Pin_OUT
Paramètres:
-Méthode de normalisation de l'alignement
-Méthode de segmentation
-Méthode de calcul du déplacement
-Méthode de transformation
-Méthode de reconstruction d'arrière-plan
-Méthode de raffinement des bords
Sortie : Ensemble de données synthétiques avec des images Pin_Out variées et positionnées avec précision
1 : Charger les images 1.1 : Charger la série d'images Pin_OK 1.2 : Charger l'image modèle Pin_OUT 2 : Normaliser l'alignement 2.1 : Normaliser l'alignement de la broche dans la série d'images Pin_OK sur un position de référence standard 3 : traiter chaque image Pin_OK normalisée 3.1 : segmenter la broche à l'aide d'une méthode de segmentation basée sur la région 3.2 : calculer le déplacement nécessaire en fonction du modèle Pin_OUT 3.3 : appliquer le déplacement calculé pour ajuster la position de la broche et créer une image synthétique Pin_Out 3.4 : Reconstruire l'arrière-plan où l'épingle a été initialement placée 3.5 : Affiner les bords de l'épingle déplacée pour assurer une intégration transparente 3.6 : Valider visuellement la qualité de l'image synthétique 3.7 : Si la qualité est acceptable, ajouter l'image synthétique à l'ensemble de données 3.8 : Si des ajustements sont nécessaires, affinez les paramètres et répétez le processus 4 : Répétez pour toutes les images 4.1 : Continuez le processus pour toutes les images Pin_OK de la série pour créer un ensemble de données complet avec des positions Pin_Out variées

Face à la rareté des positions de broches dangereuses, une nouvelle méthode de création de données synthétiques impliquant le clonage en arrière-plan à partir d'images vidéo originales a été introduite (Figure 6). Le clonage permet de générer des représentations variées de la classe minoritaire, corrigeant ainsi la distribution asymétrique des données. Les premières tentatives ont abouti à des images imparfaites aux bords irréguliers, mais le processus a été affiné grâce à un affinement itératif, aboutissant à des images synthétiques haute fidélité qui ont considérablement renforcé l'ensemble de données. L'ajout de cadres synthétiques a facilité le réglage fin de la précision et du rappel du modèle, ce qui est crucial pour l'efficacité des systèmes d'inspection automatisés et garantit une plus grande sensibilité aux faux négatifs, une priorité pour les systèmes de sécurité routière. L'approche de clonage s'est avérée essentielle pour contourner les limitations imposées par les méthodes manuelles de collecte de données, ouvrant la voie à un moyen plus sûr et plus efficace de former des modèles de détection robustes.

Comme le montre la figure 6, la création d'images synthétiques à l'aide d'un éditeur d'images prend au moins 20 minutes par image, soulignant la nécessité d'une solution plus efficace et automatisée (Tableau 2). Le processus commence par le chargement d'une série d'images où la broche est dans une position sûre (Pin_OK) et d'une image modèle où la broche est dans une position dangereuse (Pin_OUT). La méthode comporte plusieurs étapes clés : normaliser l'alignement des broches dans chaque image Pin_OK par rapport à une position de référence standard, segmenter les broches à l'aide d'une méthode de segmentation basée sur la région et calculer le déplacement nécessaire pour répliquer le modèle Pin_OUT.

Machine Translated by Google

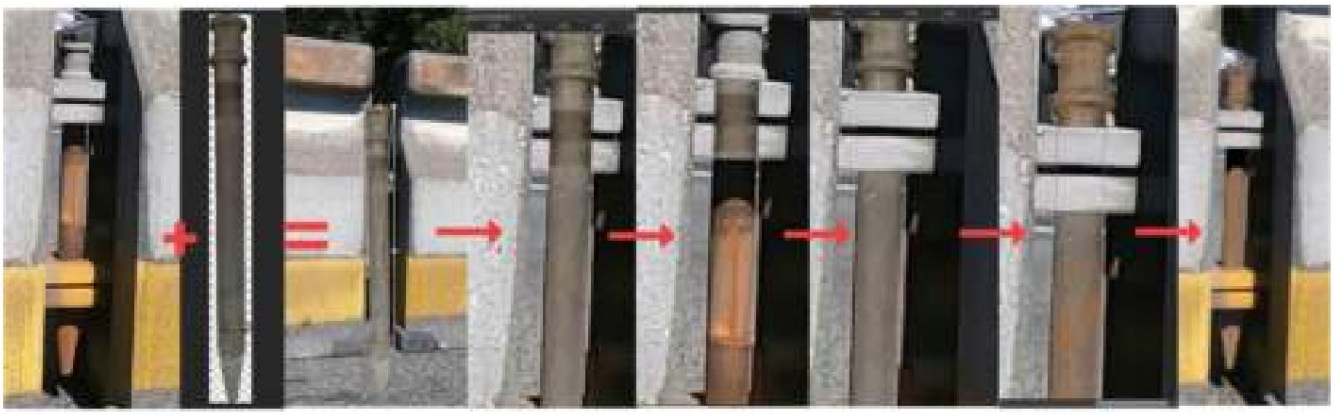


Figure 6. Génération de données synthétiques : L'image illustre les différentes étapes de manipulation d'une image vidéo pour créer des images synthétiques représentant une épingle métallique dans des positions dangereuses. En commençant par une image autonome de la broche métallique, le processus consiste à ajuster son orientation, sa position et son contexte environnemental pour générer des scénarios réalistes et dangereux.

3.2. Étape 2 : Augmentation des données

L'augmentation des données était nécessaire pour travailler avec des ensembles de données clairsemés et déséquilibrés. Nous avons également examiné des approches couramment utilisées pour améliorer la robustesse de la formation des réseaux de neurones en générant des données de formation supplémentaires à partir d'ensembles de données existants et en aidant à prévenir le surajustement (60). Les techniques d'augmentation appliquées comprenaient des transformations géométriques et affines où la rotation, le redimensionnement, la réflexion, la translation et le cisaillement ont été utilisés pour modifier la structure de l'image sans altérer son contenu [37] (Figure 7). Les transformations ont été mises en œuvre à l'aide de la boîte à outils de traitement d'images de MATLAB, ce qui a facilité l'application efficace de ces techniques. De plus, cette recherche a incorporé des méthodes pour introduire des variations réalistes dans l'ensemble de données en ajoutant des effets de bruit et de flou, en utilisant spécifiquement des modèles de bruit gaussien et sel et poivre. De tels effets sont appliqués à l'aide de la fonction imnoise de MATLAB pour l'ajout de bruit et de imgaussfilt pour le flou gaussien. De telles modifications simulaient des imperfections potentielles des données du monde réel, aidant ainsi le réseau à apprendre à gérer efficacement ces irrégularités.

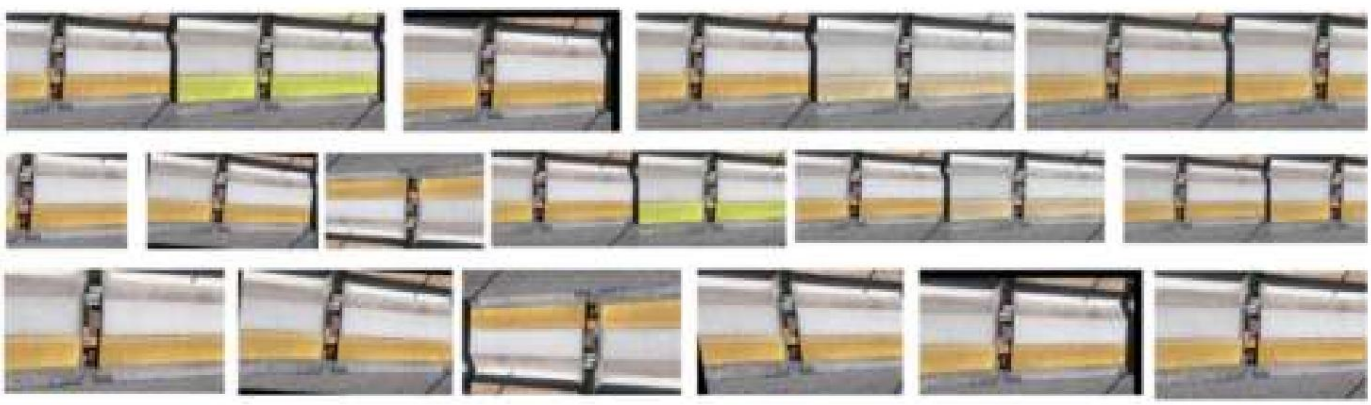


Figure 7. Les résultats illustratifs des techniques d'augmentation des données présentent la gamme de transformations d'images appliquées pour améliorer la formation du modèle. Il comprend des transformations géométriques telles que la rotation et la mise à l'échelle , des transformations affines avec diverses traductions et cisaillements, ainsi que des effets visuels tels que le flou gaussien, l'ajout de bruit et des ajustements de couleurs sophistiqués. Les modifications jouent un rôle déterminant dans la préparation du réseau neuronal à gérer des scénarios divers et réalistes rencontrés dans des applications pratiques, Xu, Yoon [61].

D'autres innovations incluent l'adoption de techniques avancées de transformation des couleurs . À l'aide de la fonction jitterColorHSV de MATLAB, les images ont été soumises à des ajustements aléatoires.

Machine Translated by Google

améliorations de la luminosité, du contraste, de la teinte et de la saturation, élargissant ainsi la gamme de données visuelles le modèle a été exposé pendant la formation. De plus, une nouvelle transformation de couleur
approche combinant des méthodes de recherche de table et une interpolation de l'espace colorimétrique 3D autorisée pour un traitement des couleurs en temps réel et de haute qualité.

L'approche globale de l'augmentation des données diversifie l'ensemble de formation, améliorant les capacités de généralisation du modèle, qui sont importantes pour des applications similaires,
y compris les contextes de villes intelligentes et l'application de la technologie pour améliorer la convivialité des espaces où l'activité humaine peut avoir lieu.

3.3. Étape 3 : Analyse de la distribution des données après le renforcement des minorités

Les cadres synthétiques ont équilibré l'ensemble de données, améliorant la précision de la classification sur un plan relativement petit ensemble de données étiqueté manuellement (Figure 8). Cette approche était avantageuse sous
conditions restrictives restreignant la collecte de données sur les classes minoritaires. De plus, les données synthétiques facilité le réglage fin des mesures de performance du modèle telles que la précision et le rappel, en se concentrant sur la réduction des faux négatifs en raison de leur caractère critique pour la sécurité.

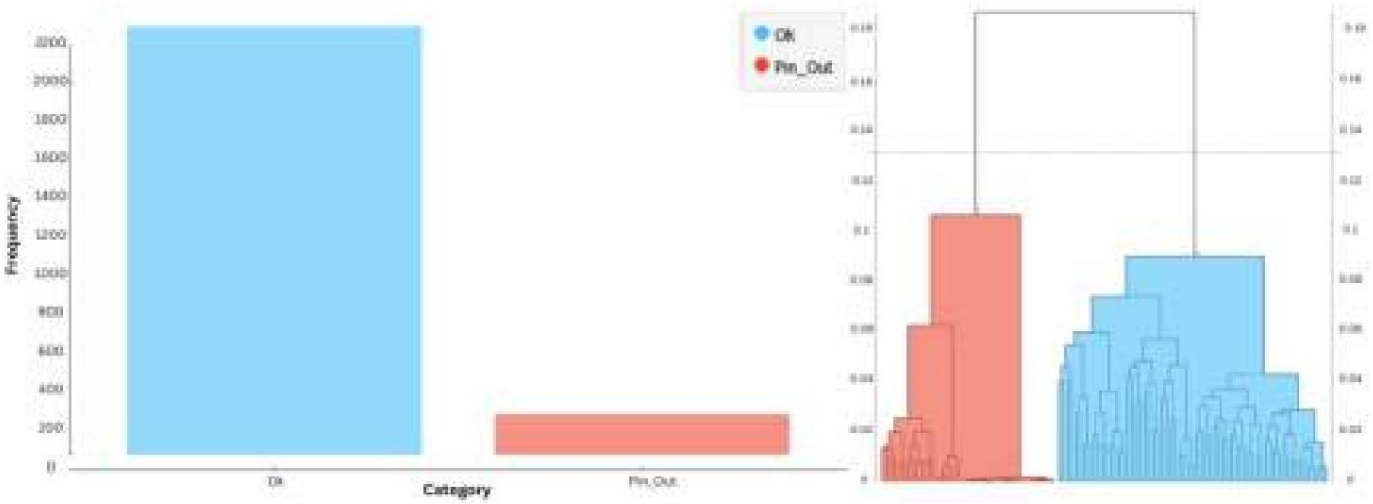


Figure 8. Le graphique du dendrogramme, dérivé des données présentées par le graphique à barres, montre deux clusters (Pin_OK (rouge) et Pin_Out (bleu)) et une séparation visuelle du multidimensionnel généré espace de fonctionnalité.

À partir d'environ 30 000 images, 2 300 images montrant les positions des broches de sécurité ont été organisé. Pour relever le défi des occurrences limitées de conditions de broches dangereuses : un problème courant lors de la formation de systèmes de détection robustes : 210 images synthétiques simulant des positions de broches dangereuses ont été générées et ajoutées à l'ensemble de données (Tableau 3).

Tableau 3. Distribution des données : aperçu du nombre d'images Pin_OK et Pin_Out utilisées pour la formation et validation sur différentes sessions d'enregistrement vidéo.

Vidéo de formation Séance n° (Tableau 1)	Données d'entraînement		Données de validation	
	Pin_OK Images	Pin_Out Images	Pin_OK Images	Pin_Out Images
1	155	32	40	5
2	725	80	180	20
2	800	40	200	dix
3	400	16	100	5

Machine Translated by Google

La création de différents degrés de positions « Pin_Out » a permis d'optimiser l'équilibre entre les faux positifs et les faux négatifs, ce qui est crucial pour affiner la précision et la robustesse du modèle (tableau 4).

Tableau 4. Résultats de classification initiaux obtenus à partir des groupes de données de la figure 8. Adoptés de Ba˘ci´c, Rathee [7].

Tableau de confusion				
Modèle			Réel	
			PIN_OK	PIN_OUT
Régression logistique	Prédit	PIN_OK	[98,5%	1,5%
		PIN_OUT	0	100%]
Réseau neuronal		PIN_OK	[98,9%	1,1%
		PIN_OUT	0	100%]
SVM		PIN_OK	[98,1%	1,9%
		PIN_OUT	0	100%]

Les trames synthétiques variant dans les positions Pin_Out ont amélioré le réglage des faux positifs (FP) et faux négatifs (FN). L'objectif est d'atteindre FP > FN en utilisant un ensemble de données avec positions de broches à la limite des dangers, améliorant ainsi la précision de la classification. La précision a été mesurée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Précision} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (8)$$

TP représente les vrais positifs ou les trames Pin_Out correctement identifiées, et TN représente les vrais négatifs ou les trames Pin_OK correctement identifiées. La précision, le rapport des observations positives correctement prédites au total des positifs prédits, est défini comme suit:

$$\text{Précision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

L'approche globale impliquait une validation croisée stratifiée méticuleuse en trois volets processus, comme détaillé dans le tableau 5.

Tableau 5. Test de validation croisée et résultats des scores mis à jour à partir de la recherche initiale.

Validation croisée stratifiée en 3 volets		
Modèle	Précision	Rappel
Paramètres de régression logistique : Régularisation : Crête (L2), C = 1	0,995	0,995
Perceptron multicouche (MLP)- Paramètres: Couches cachées : 2 Neurones : Fonction d'activation : ReLu Solveur : Adam Alpha : 0,02 Max. itérations : 200 Algorithme de rétropropagation	0,995	0,995
Paramètres de la machine à vecteurs de support (SVM) : C = 1,0, ε = 0,1 Noyau : Linéaire Tolérance numérique : 0,001 Max. itération : 100	0,985	0,984

Machine Translated by Google

3.4. Étape 4 : Détection de la région d'intérêt (ROI)

Notre équipe de recherche a étudié de manière approfondie diverses méthodologies de détection de régions d'intérêt (ROI) pour développer un système automatisé de détection de broches pour les applications de gestion du trafic. Chaque méthode a été examinée pour sa capacité à identifier avec précision les emplacements des broches dans les images vidéo dans diverses conditions environnementales. Le croisement de différentes méthodologies a mis en lumière les défis et le potentiel de chaque approche, ce qui nous a permis de trouver une solution particulièrement efficace. Initialement, notre exploration a utilisé des méthodes de proposition de région, qui calculent des cadres de délimitation autour des retours sur investissement potentiels (Figure Bien qu'initialement prometteuse, l'approche a nécessité de fréquents ajustements manuels pour garantir la précision de la détection et du comptage, ce qui la rend moins réalisable pour les applications dynamiques du monde réel où l'automatisation est primordiale. Un modèle de mélange gaussien (GMM) a été utilisé pour la modélisation adaptative de fond (Figure 9B). Le GMM était capable de segmenter les épingles en mouvement à partir d'arrière-plans statiques en modélisant la distribution de densité de probabilité des intensités de pixels. Malgré son efficacité dans la différenciation au premier plan, le GMM a nécessité un post-traitement approfondi pour localiser chaque broche avec précision, limitant ainsi son utilité autonome dans la détection précise du retour sur investissement. Nous avons également exploré la segmentation basée sur les couleurs à l'aide du regroupement K-Means dans les espaces colorimétriques RVB, LAB et HSV, ce dernier étant particulièrement apprécié en raison de sa résilience face aux variations d'éclairage (Figure 9A). La méthode exploitait les signatures de couleur uniques des épingles, mais se heurtait à des limites de spécificité, capturant souvent des objets sans rapport partageant des profils de couleurs similaires.

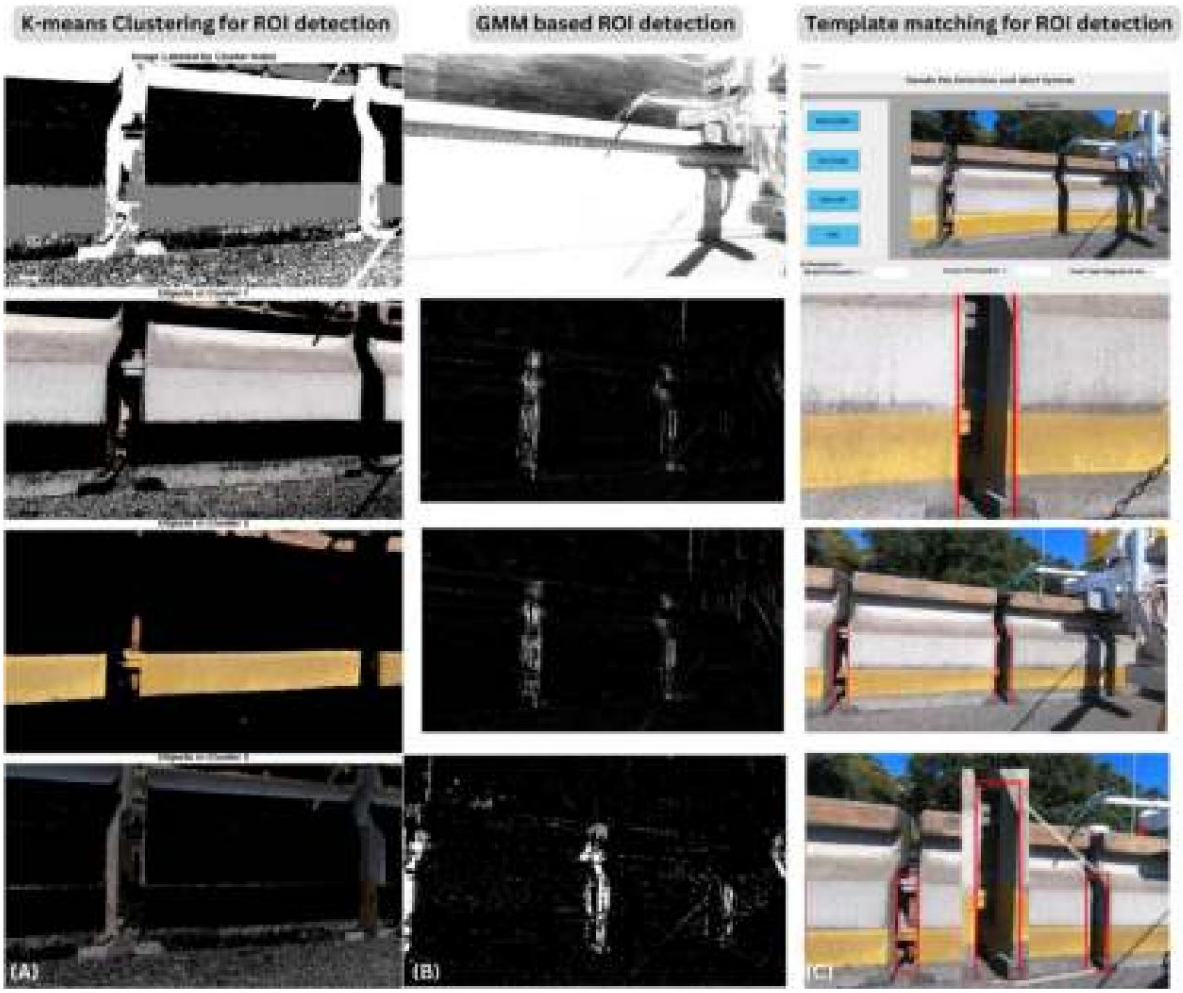


Figure 9. Analyse comparative des techniques prometteuses de détection du retour sur investissement dans la détection automatisée des broches : (1) segmentation basée sur la couleur utilisant le clustering K-Means dans l'espace colorimétrique HSV, mettant en évidence l'unique

Machine Translated by Google

signatures de couleur des épingles tout en relevant les défis de spécificité. (2) La détection basée sur le modèle de mélange gaussien (GMM) illustre la segmentation avant-plan et le suivi du mouvement des broches entre les blocs de béton. (3) Application Regionprops, présentant la correspondance de modèles et la détection automatisée du cadre de délimitation pour une localisation précise et une intervention manuelle réduite dans la détection et l'étiquetage du retour sur investissement des broches.

Les méthodes essayées dans la figure 9 nous ont conduit à adopter la fonction regionprops de MATLAB , qui s'est avérée supérieure pour relever les défis de précision et d'automatisation des méthodes précédentes. Le regionprops analyse chaque composant connecté dans des images vidéo binaires, quantifiant efficacement les coordonnées de la zone et du cadre de délimitation pour chaque retour sur investissement détecté. La fonction a amélioré la précision de la détection des broches et a facilité une réduction significative des interventions manuelles en automatisant le processus de détection du retour sur investissement.

Les concepts mathématiques sous-jacents à la fonction regionprops font partie intégrante de ses performances (équations (8) à (13)).

Superficie : la superficie d'une région est calculée en fonction du nombre de pixels qu'elle contient.

$$\text{Aire} = \sum(i,j) \quad R\ 1 \tag{dix}$$

Dans cette équation, la zone représente le nombre total de pixels dans la région R. Chaque pixel de la région apporte une valeur de 1 à la zone totale, comptant ainsi les pixels.

Centroïde : le centroïde est déterminé en faisant la moyenne des positions de tous les pixels de la région, comme suit :

$$\text{Centroïdex} = \frac{1}{N} \sum(i,j) \quad R\ i,\ \text{Centroïdie} = \frac{1}{N} \sum(i,j) \quad R\ j \tag{11}$$

Boîte englobante : La boîte englobante, qui entoure la région, est définie par les coordonnées x et y minimales et maximales des pixels.

$$\text{BoundingBox} = [\text{xmin}, \text{ymin}, \text{xmax} - \text{xmin} + 1, \text{ymax} - \text{ymin} + 1] \tag{12}$$

Longueur des axes majeur et mineur : pour les régions approximées par des ellipses, les longueurs des axes majeur et mineur sont dérivées des valeurs propres de la matrice de covariance du pixel. coordonnées.

$$\text{Longueur de l'axe majeur} = 2 \sqrt{\frac{\lambda 1}{N}},\ \text{MineurAxisLength} = 2 \sqrt{\frac{\lambda 2}{N}} \tag{13}$$

Orientation : L'orientation d'une telle ellipse, indiquant l'angle entre l' axe des x et le grand axe, est calculé en utilisant les seconds moments de la région.

$$\text{Orientation} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu 11}{\mu 20 - \mu 02} \right) \tag{14}$$

Périmètre : le périmètre est mesuré en additionnant les distances entre les pixels limites consécutifs.

$$\text{Périmètre} = \sum \text{boundrypixels distance entre les pixels limites consécutifs} \tag{15}$$

L'intégration de regionprops dans notre méthode fait progresser considérablement l'automatisation de la détection des broches. Cette amélioration offre une précision et une efficacité élevées, essentielles pour les systèmes de gestion du trafic exigeant fiabilité et rapidité de traitement.

Notre mise en œuvre réussie souligne l'importance d'une approche méthodique dans la recherche en ingénierie, démontrant comment les tests itératifs et l'intégration de diverses techniques peuvent résoudre des problèmes complexes du monde réel. Cette étude met en évidence l'efficacité de la combinaison de méthodes traditionnelles de traitement d'images avec des outils analytiques avancés et établit une nouvelle norme pour les recherches futures sur les systèmes automatisés de sécurité et de gestion du tr

Machine Translated by Google

Les résultats fournissent un cadre solide permettant aux chercheurs et aux praticiens d'améliorer systèmes de détection automatisés dans tous les domaines d'ingénierie.

3.5. Étape 5 : Formation et validation du modèle

Le système informatique (tableau 6) offrait des capacités matérielles suffisantes pour former les modèle au cœur du système développé « Système de détection et d'alerte des broches non sécurisées ».

Tableau 6. Système de développement utilisant l'architecture de traitement parallèle GPU NVIDIA.

Configuration du système	
Processeur	Processeur Intel Core i7
Mémoire	32 Go de RAM
Disque dur	Disque SSD de 512 Go
Graphique	NVIDIA GeForce RTX2070 Super 8 Go GFX
Système opérateur	Windows 10

ResNet-50, amélioré avec des convolutions 3D dans le cadre STENet, a été sélectionné après une comparaison approfondie avec d'autres modèles comme Squeezenet, GoogLeNet, InceptionV3 et Mobilenetv2. ResNet-50 est favorisé en raison de son équilibre optimal entre efficacité et performances de calcul, confirmées par des évaluations satisfaisantes de la RAM GPU lors des premières expériences (Tableau 7).

Tableau 7. Comparaison des réseaux de neurones profonds pré-entraînés en fonction de la résolution de l'image d'entrée et du nombre des paramètres, de la profondeur et de la taille du modèle.

Réseaux de neurones profonds pré-entraînés				
Modèle	Image d'entrée Résolution	Paramètres (1 000 000)	Profondeur	Taille
AlexNet	227 × 227	61		227
PresserNet	227 × 227	1,24	8	4.6
GoogleNet	224 × 224	7	18 22	27
Création v3	299 × 299	23,9	23,9	48
MobileNet v2	224 × 224	3,5	3,6	53
Réseau 50	224 × 224	25.6	50	96

Divers éléments environnementaux, tels que le feuillage de couleur rouille, correspondaient étroitement à la apparence de broches métalliques rouillées, ce qui rend la différenciation visuelle difficile. De la même manière, des épingles métalliques non rouillées partageaient la même couleur que la surface de la route et les pneus du passage véhicules, ce qui complique encore davantage le processus d'identification. Les barrières métalliques à l'arrière-plan avaient souvent des formes ressemblant au profil horizontal des broches métalliques, tandis que le les couleurs dynamiques des véhicules qui passent introduisent d'intenses variations de fond. En outre Pour étiqueter les statuts des broches, des régions d'intérêt (ROI) ont été définies sur chaque image à l'aide de la méthode regionprops pour faire la distinction entre les caractéristiques pertinentes et l'arrière-plan potentiel bruit. Cette méthode, qui analyse chaque composant connecté dans des images vidéo binaires pour quantifier la zone et les coordonnées du cadre de délimitation pour chaque retour sur investissement détecté, de manière significative amélioré la précision de la détection des broches et réduit les interventions manuelles. Le combiné la prise en compte de l'homogénéité de la forme et de la couleur était un facteur important dans la formation de l'AHB modèle de détection de broches (Figure 10).

De plus, certaines parties du système de barrière mobile en béton (MCB) sont étroitement ressemblait à la forme des broches métalliques, créant une confusion supplémentaire (Figure 11(3)). Ces facteurs ont rendu la tâche de détection difficile, car le système devait faire la différence entre plusieurs éléments visuellement similaires dans des conditions variables. L'ensemble de données a ensuite subi une série de processus d'augmentation d'image pour simuler diverses conditions opérationnelles non couvert par la capture vidéo initiale. Les processus comprenaient des transformations géométriques

Machine Translated by Google

telles que les rotations, la mise à l'échelle, les traductions et l'ajout de perturbations d'image telles que le flou gaussien et le bruit, qui sont cruciaux pour que les modèles d'entraînement fonctionnent correctement dans des conditions de déploiement pratiques.



Figure 10. Illustration des défis de fond liés à la détection du retour sur investissement.



Figure 11. Des exemples de détection de broches mélangés à une détection de faux positifs (3) illustrent un niveau élevé de bruit de fond qui ressemble aux caractéristiques de la ROI.

Un élément essentiel du processus de formation était l'ajustement du taux d'apprentissage, un paramètre qui a un impact significatif sur la convergence et les performances finales du modèle.

Machine Translated by Google

Des taux d'apprentissage allant de 0,01 à 0,00001 en utilisant ResNet-50 ont été testés (Figure 12). Le taux optimal a été déterminé grâce à une série d'essais évaluant la précision du modèle et les mesures de perte. Les expériences ont utilisé des courbes ROC pour représenter visuellement les compromis entre les taux de vrais positifs et de faux positifs à différents réglages de seuil, permettant une sélection éclairée du modèle le plus performant dans les conditions de formation données. Les résultats ont systématiquement montré qu'un taux d'apprentissage de 0,0001 offrait le meilleur équilibre entre vitesse d'entraînement et précision du modèle.

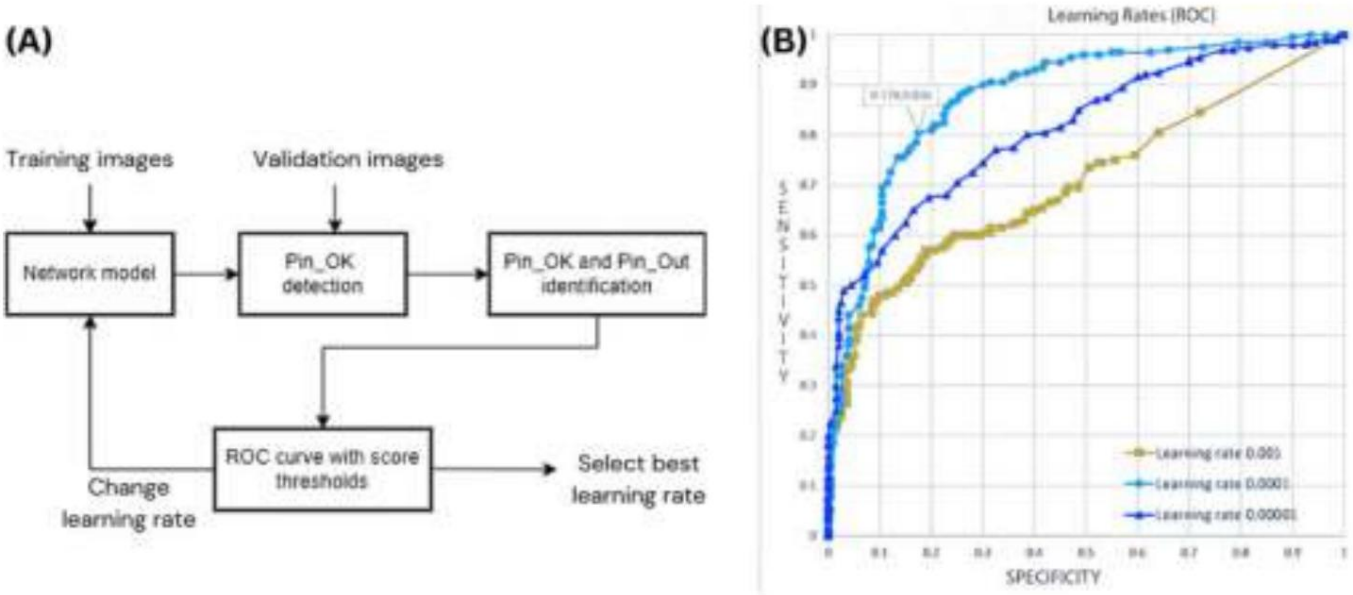


Figure 12. Le processus de formation pour trouver le meilleur modèle de réseau basé sur le taux d'apprentissage : (A) flux du processus de formation ff et (B) courbes ROC pour différents taux d'apprentissage montrant la performance des taux d'apprentissage. Le taux d'apprentissage de 0,0001 a été choisi car il équilibre la vitesse et la précision de l'entraînement, offrant de meilleures performances tout en évitant le coût et le temps de calcul élevés.

En conclusion, cette recherche a détaillé la sélection, la préparation et la formation d'un modèle d'apprentissage profond capable de détecter et de classer l'état des broches métalliques dans les barrières mobiles en béton . L'approche méthodologique, mettant l'accent sur la création d'un ensemble de données de formation complet et diversifié grâce à des images réelles et synthétiques et des protocoles de formation de modèles rigoureux, démontre une solution évolutive et efficace pour améliorer la sécurité des infrastructures publiques grâce à des techniques avancées d'IA.

3.6. Étape 6 : Analyse et tests du modèle

L'architecture STENet, inspirée et basée sur le cadre robuste de ResNet-50, présente un potentiel considérable pour les tâches de détection d'anomalies spatio-temporelles, telles que celles nécessaires à la surveillance du pont du port d'Auckland (AHB). Bien que ResNet-50 ait été initialement développé pour la classification d'images, ses solides capacités d'extraction de caractéristiques spatiales en font une base solide pour de nouvelles améliorations dans l'analyse des données vidéo et des flux en direct.
STENet intègre des composants de ResNet-50 avec des convolutions 3D pour capturer des informations spatiales et temporelles, facilitant ainsi l'analyse directe du mouvement et des changements dynamiques dans les séquences vidéo. D'autres améliorations impliquent l'exploitation des capacités d'extraction de caractéristiques spatiales et des réseaux neuronaux récurrents (RNN) de ResNet-50 pour suivre les séquences temporelles ou l'utilisation de méthodes de regroupement temporel pour résumer efficacement les segments vidéo.

En adoptant des stratégies de simplification des modèles, de calcul de pointe et d'apprentissage incrémentiel, STENet améliore l'efficacité du système et sa réactivité aux nouvelles anomalies. Cela rend STENet particulièrement adapté aux applications de surveillance continue et de contrôle du trafic . Le tableau 8 met en évidence les mesures de performance de STENet par rapport à d'autres modèles. En incorporant des adaptations des fonctionnalités principales de ResNet-50, STENet reconnaît efficacement

Machine Translated by Google

les écarts d'apparence et de comportement au fil du temps, fournissant un cadre robuste pour la détection des anomalies en temps réel dans divers environnements opérationnels (Figure 13).

Tableau 8. Le réseau spatio-temporel amélioré (STENet) atteint une précision exceptionnelle de 95,2 % et un F1-Score de 94,8 %, démontrant sa capacité exceptionnelle à relever les défis du bruit de fond et des petits retours sur investissement, avec un ROC-AUC remarquable de 98,5 %, renforçant ainsi son robustesse dans la différenciation des classes dans les tâches spatio-temporelles.

Modèle	Précision	Précision	Rappel	F1-Score	ROC-AUC	Entraînement Temps	Inférence Temps	Nombre de Paramètres
STENet	95,2%	94,5%	95,2%	94,8%	98,5%	4 heures	80 ms	25 M
VGG-19	88,0%	88,5%	89,0%	88,7%	94,0%	6,5 heures	90 ms	142 M
ResNet-50	90,0%	90,3%	91,0%	90,6%	95,8%	4 heures	70 ms	25,6 millions
CréationV3	91,0%	91,2%	91,5%	91,3%	96,0%	3,5 heures	65 ms	23,8 millions
PresserNet	85,0%	85,5%	86,0%	85,7%	92,0%	2,5 heures	35 ms	1,25 M

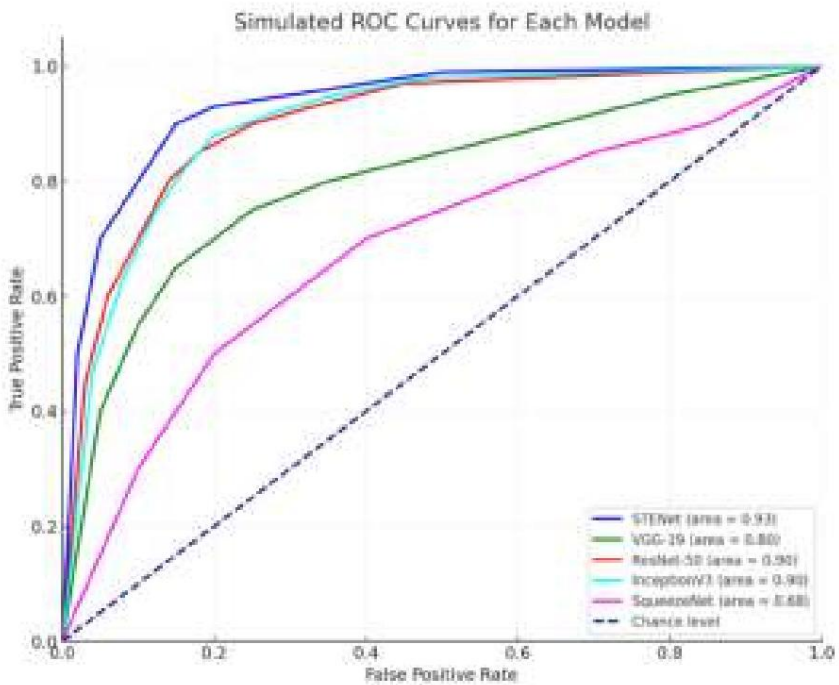


Figure 13. Comparaison de la courbe ROC du tableau 8.

4. Résultats et discussion

L'efficacité du système de détection et d'alerte des broches, qui englobe à la fois la région des broches La détection et le suivi des centres d'intérêt (ROI), ainsi que les fonctionnalités de détection de l'état des broches et d'alerte , ont fait l'objet d'une évaluation critique. Les évaluations se sont appuyées sur des méthodes précédemment détaillées, avec une attention particulière aux conditions opérationnelles qui influencent les performances du système.

4.1. Préparatifs, protocole d'enregistrement des données, résultats et informations

Les performances du système ont été évaluées en examinant les vidéos enregistrées image par cadre, en se concentrant sur le suivi du retour sur investissement des broches. Plusieurs facteurs environnementaux et opérationnels ont été identifiés qui pourraient affecter négativement les résultats.

- Conditions d'éclairage : le temps couvert a considérablement gêné la visibilité, rendant difficile la détection des épingles entre les blocs de béton et rendant la détection et la détection plus difficiles. les processus de comptage ne sont pas fiables.

Machine Translated by Google

• Mouvements de fond : les véhicules en mouvement introduisaient un bruit de fond important , nuisant gravement à la précision de la détection. Si la teinte grisâtre de la route et les blocs de béton contribuaient à simplifier l'arrière-plan, les gros véhicules qui passaient perturbaient la clarté visuelle. De plus, les couleurs rouille et jaune des barrières mobiles en béton (MCB) et les fragments de barrières en béton brisées et de barrières métalliques se fondaient souvent dans les régions d'intérêt (ROI) des broches, diminuant encore davantage la précision du suivi. • Ombres et éclairage : les ombres projetées sur les ROI des broches étaient parfois interprétées à tort comme des objets en mouvement. Des ombres plus sombres pourraient compromettre les systèmes de détection et de suivi, en particulier en plein soleil.
• Distorsions vibratoires : des vitesses opérationnelles supérieures à 6 km/h induisaient des vibrations excessives, brouillant les images et introduisant du bruit de fond, compliquant encore davantage les processus de détection.

Pour atténuer les variabilités liées aux conditions météorologiques, plusieurs vidéos enregistrées dans des conditions ensoleillées ont été analysées. La première vidéo, capturant un champ plus large depuis le bras avant de la machine de transfert de barrière (BTM), affichait environ deux ROI par image, tournée par un après-midi clair. La deuxième vidéo, prise depuis le bras arrière du BTM, montrait un champ de vision plus étroit avec parfois seulement une visibilité partielle d'une ROI à une seule broche.

4.2. Création de cadres synthétiques

Le concept de création de cadres synthétiques s'est heurté à des défis importants. Les techniques de clonage initiales étaient insuffisantes, produisant un ensemble de données minoritaires non viables, ce qui a nécessité le passage des techniques de classification aux approches mathématiques traditionnelles. Des consultations ultérieures avec des experts graphiques ont conduit à l'adoption de méthodes avancées utilisant Photoshop et Gimp pour générer des cadres synthétiques (Figure 14).

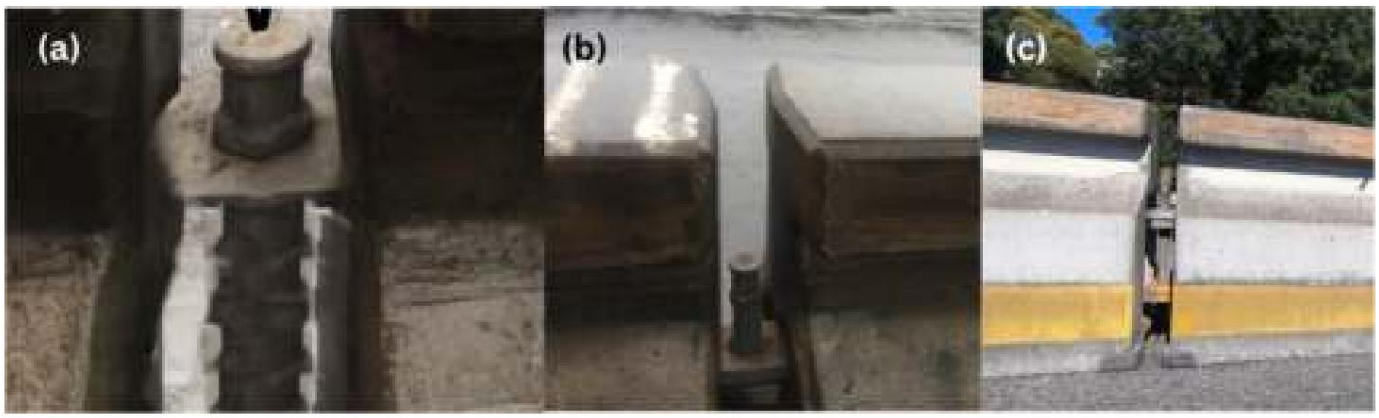


Figure 14. Processus de clonage pour créer des images synthétiques représentant la position « PIN OUT ». (a) Tentatives échouées jusqu'au succès (b, c); deux angles distincts : (b) caméra montée sur le bras arrière de la machine de transfert de barrière (BTM) et (c) caméra montée sur le bras avant de la BTM pour une précision de modélisation améliorée.

Environ 40 images synthétiques ont été créées à partir de séquences vidéo capturées sur un téléphone mobile pendant la phase de preuve de concept. Un deuxième lot de plus de 200 images synthétiques a ensuite été produit à partir d'enregistrements vidéo de meilleure qualité, démontrant une amélioration notable de la clarté des images entre les productions initiales et ultérieures. Compte tenu de la nature fastidieuse de la création manuelle de cadres, des efforts ont été déployés pour automatiser le processus à l'aide du panneau d'action de Photoshop. Cependant, la complexité des éléments de fond a empêché une automatisation complète. Bien que MATLAB propose des techniques de clonage de pixels, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour développer une méthode entièrement automatisée et robuste pour la génération de trames synthétiques. L'analyse souligne les dépendances critiques des conditions environnementales sur les performances des systèmes de détection d'épingles et souligne le besoin cont

Machine Translated by Google

améliorations techniques dans la génération de données synthétiques pour prendre en charge une formation et une validation de systèmes robustes.

4.3. Prototype du système : fonctionnalité de suivi, de comptage et d'alerte des broches

métalliques Le développement du système de détection et d'alerte des broches métalliques a été guidé par l'exigence que l'utilisateur final, présumé non technique, dispose d'une interface simplifiée pour un fonctionnement efficace du système. Le prototype du système, nommé « Unsafe Pin Detection and Alert System » (Figure 15), a été conçu et implémenté à l'aide de MATLAB App Designer [62], intégrant des opérations back-end avec une interface utilisateur graphique (GUI).



Figure 15. Interface utilisateur graphique pour le « Système de détection et d'alerte des broches non sécurisées ».

Fonctionnalités du système

L'application permet à l'utilisateur final de télécharger une vidéo ou une séquence d'images pour analyse. Lors du téléchargement, l'application exploite un réseau de détection de l'état des broches basé sur l'apprentissage profond pour analyser le flux vidéo. Le système maintient un décompte des broches métalliques et s'il détecte une broche dans une position dangereuse, il déclenche une alerte et affiche le retour sur investissement spécifique de la broche métallique sur l'écran.
La deuxième fonctionnalité prend en charge l'analyse du flux en direct, où l'utilisateur peut connecter l'application à un flux de caméra en direct. Le réseau de détection des broches s'active pour analyser les trames entrantes en temps réel à mesure que le flux en direct est transmis à l' application de surveillance du système de détection et d'alerte des broches non sécurisées (Figure 15). Comme l'analyse préenregistrée, le système suit et compte les ROI des broches métalliques, alertant l'utilisateur et affichant le numéro de ROI lorsqu'une broche dangereuse est détectée.
L'interface du système de détection et d'alerte des broches métalliques, comme le montre la figure 15, est conçue pour être intuitive et facilement navigable, garantissant que les utilisateurs peuvent utiliser le système sans connaissances techniques préalables. La conception et la logique opérationnelle de l'application ont été spécifiquement adaptées pour répondre aux besoins de la NZTA, permettant des modifications personnalisées pour répondre à des exigences opérationnelles ou à des mises à jour spécifiques.

En conclusion, en théorie, l'App du système d'alerte est prête à être déployée. Il existe un potentiel de développement ultérieur vers un déploiement complet du produit, en attendant l'intérêt et le soutien supplémentaire de la NZTA. Les travaux futurs se concentreront sur le perfectionnement des fonctionnalités de l'application , l'amélioration de ses performances et la garantie de son installation sur site et de son intégration dans les systèmes d'infrastructure existants. De telles améliorations dépendent toutefois de la disponibilité de ressources supplémentaires et de l'intérêt continu des parties prenantes.

Machine Translated by Google

4.4. Résultats

L'évaluation des performances du modèle STENet visait à trouver et localiser l'état Pin_Out à l'aide des spécifications du poste de travail décrites précédemment dans le tableau 6. Nous avons appliqué les modèles au suivi image par image et au comptage en temps réel de la région d'intérêt (ROI) de la broche, en attribuant à chaque ROI de la broche un index à maintenir. continuité entre les images. Les configurations du modèle de détecteur sont résumées dans le tableau 9, qui détaille des paramètres tels que la taille du lot, le nombre d'époques, le taux d'apprentissage et l'optimiseur les choix. Deux techniques d'optimisation ont été utilisées, la descente de gradient stochastique avec Momentum (SGDM) et Adam, tous deux choisis pour leur capacité à améliorer les performances du modèle grâce à une recherche de direction efficace dans le paysage d'optimisation [63,64].

Tableau 9. Configuration du modèle de détecteur. Le tableau répertorie la taille du lot, le nombre d'époques, l'apprentissage taux et optimiseur utilisé pour entraîner le modèle de détecteur. Deux techniques d'optimisation différentes, Descente de gradient stochastique avec élan (SGDM) et estimation adaptative du moment (Adam), ont été utilisés pour améliorer les performances du modèle.

Modèle	Taille du lot	Époque	Taux d'apprentissage	Optimiseur
Détecteur	64	100	0,0001	SGDM
	64	100	0,0001	Adam

L'exactitude du suivi du retour sur investissement des broches a été évaluée en comparant la cohérence de l'index affectation d'image en image. Les écarts dans la continuité de l'indice ont été notés sous forme d'erreurs dans suivi. L'ensemble de données a été divisé en 70 % de cadres de formation, 10 % de validation et 20 % de tests. cadres pour évaluer le modèle de manière robuste dans des conditions variées. Le processus de formation utilisant SGDM a obtenu des temps de formation plus rapides qu'Adam, comme le montre le tableau 10. La validation des modèles ont démontré une erreur quadratique moyenne (RMSE) et des pertes de validation inférieures avec SGDM, indiquant un chemin d'optimisation plus efficace.

Tableau 10. Processus de formation et de validation SGDM.

Époque	Itération	Temps Écoulé	Mini-lot (RMSE)	Validation (RMSE)	Minilot Perte	Validation
dix	150	00.15.05	0,91	0,87	0,8285	0,7910
20	300	00.30.20	0,74	0,83	0,5384	0,6761
30	450	00.45.12	0,66	0,78	0,4141	0,6329
40	600	01.00.15	0,62	0,76	0,3968	0,5809
50	750	01.14.50	0,56	0,77	0,3182	0,4150
60	900	28.01.58	0,53	0,76	0,2708	0,4060
70	1050	01.44.55	0,52	0,74	0,2408	0,3716
80	1200	01.58.21	0,50	0,76	0,2018	0,3208
90	1350	13.02.43	0,48	0,75	0,1808	0,2710
100	1500	27.02.23	0,47	0,74	0,1280	0,2219

Les résultats de la classification ROI des broches et la précision de la détection de la boîte englobante par les STENet formés sont représentés dans la figure 16. Le système s'est avéré très efficace pour reconnaître les états Pin_OK et Pin_Out, même lorsque les ROI des broches étaient partiellement masquées ou étroitement positionné, ce qui remet traditionnellement en question la précision de la détection. Cependant, la précision diminué dans les images où les broches étaient trop rapprochées ou partiellement hors du champ de vue.

Machine Translated by Google



Figure 16. Images vidéo ROI des broches sélectionnées montrant les superpositions générées avec des cadres de délimitation.

Bien que le système ait démontré des performances robustes dans des conditions de visualisation idéales, le la précision de la détection variait selon les champs de vision et les conditions d'éclairage, soulignant la nécessité d'un ensemble de données de formation plus diversifié. La création de cadres synthétiques pour augmenter l'ensemble de données a été exploré, mais l'automatisation du processus reste un défi pour les travaux futurs, car la création manuelle de cadres s'est avérée chronophage. Le tableau 11 présente les métriques de classification (exactitude, précision et rappel) après la formation, en mettant en évidence les la solide performance globale du modèle.

Tableau 11. Performances du STENet où ResNet 50 est utilisé comme classificateur.

Des classes	Précision		Précision		Rappel	
	Entraînement	Validation	Validation de la formation		Former	Validation
Pin_Ok	0,952	0,945	0,942	0,940	0,940	0,945
Pin_Out	0,925	0,922	0,910	0,900	0,900	0,890

Malgré les variations dues à la diversité limitée des données sur les classes minoritaires, le classificateur maintient une exactitude et une précision élevées dans les deux classes. Des performances constantes les métriques des classes 'Pin_Ok' et 'Pin_Out' démontrent la robustesse du modèle et fiabilité dans l'identification et la classification des instances de classe majoritaires et minoritaires.

Les résultats soulignent l'application pratique des modèles d'apprentissage profond aux broches métalliques tâches de détection, soulignant la nécessité d'améliorer encore la formation des modèles et

Machine Translated by Google

génération de données synthétiques pour gérer efficacement divers scénarios opérationnels. Les principales contributions de la recherche à l'ARDAD sont répertoriées comme suit :

- Analyse spatio-temporelle pour la surveillance automatisée des barrières de circulation sur Auckland Harbour Bridge et autres emplacements de circulation utilisant la même barrière pour contrôler la circulation ;
- Transformer un PoC [7] en un MVP avec des algorithmes d'IA déployables pour le temps réel ARDAD, exemple de la traduction de la recherche en pratique ; • Méthodes de génération de données synthétiques semi-automatiques pour améliorer les modèles d'apprentissage automatique pour les tâches ARDAD complexes, en traitant de la rareté et de la rareté des données sur les événements de trafic critiques ;
- Intégration de l'apprentissage automatique avec la manipulation du noyau pour la détection dynamique des anomalies afin d'améliorer la précision des systèmes ARDAD actuels, augmentant la précision de détection moyenne de 0,826 à 0,939 ;
- S'engager dans une collaboration interdisciplinaire pour aligner les avancées de l'ARDAD sur les exigences des parties prenantes, en fusionnant la recherche informatique avec les solutions de gestion du trafic.

4.5. Discussion

Les premières tentatives d'enregistrement de vidéos à grande vitesse depuis les transports publics et les voitures personnelles présentaient des défis importants. Les prévisions de circulation indiquaient que les vitesses pouvaient parfois descendre en dessous de 20 km/h sur le pont du port d'Auckland, ce qui permettrait idéalement de capturer des images à 240 ips montrant des alignements parfaits des broches. Cependant, ces conditions étaient rarement remplies et le recours aux embouteillages aux heures de pointe n'a pas donné les résultats escomptés en raison des temps d'arrêt irréguliers et des limites de l'équipement d'enregistrement. Compte tenu des exigences de sécurité critiques sur le pont du port d'Auckland, tous les efforts de collecte de données ont été supervisés par des experts de la NZTA, qui ont également fourni l'accès à la machine de transfert de barrière (BTM) et au site d'exploitation, ainsi que les briefings de sécurité nécessaires. Pour voir les espaces étroits entre les segments de béton mobiles, des caméras à haute fréquence d'images (GoPro 5, GoPro 8 et GoPro 9) ont été montées sur le BTM, qui se déplaçait entre 6 et 9 km/h.

Des enregistrements ont été réalisés dans diverses conditions météorologiques et à différents moments de la journée pour capturer divers scénarios opérationnels. La difficulté de trouver et d'enregistrer les épingles mal positionnées a considérablement gêné le processus de recherche. Après de nombreuses tentatives infructueuses, les cadres synthétiques ont été adoptés comme solution viable. Un rapport intermédiaire a été fourni à la NZTA, présentant le regroupement hiérarchique et une séparation visuelle des vecteurs de caractéristiques liés à la classe de sortie minoritaire à l'aide de mesures de distance basées sur la corrélation de Pearson De telles mesures plus exigeantes en termes de calcul ont été sélectionnées par rapport à des mesures plus simples comme Euclidienne en raison de la grande dimensionnalité des caractéristiques extraites des CNN par rapport au nombre d'échantillons de classes minoritaires, y compris la nécessité d'extraire des informations invariantes aux conditions d'éclairage, aux précipitations ou aux couleurs d'arrière-plan des véhicules qui passent. .

Les classifications au-delà du binaire (broche en position ou hors position) restent inexplorées, comme les scénarios dans lesquels le retour sur investissement de la broche est entièrement obscurci ou les broches métalliques sont partiellement retirées. L'extension de la classification binaire à un système multiclasse pourrait permettre aux futurs systèmes de détecter différents types de dommages nécessitant différentes actions de maintenance. Des ensembles de données supplémentaires capturant un plus large éventail d'anomalies et davantage de données synthétiques seraient nécessaires pour prendre en charge de telles améliorations, en suivant les méthodologies décrites dans notre algorithme de création de données synthétiques dans le tableau 2. La précision de détection moyenne obtenue était de 0,93, ce qui est louable compte tenu de la précision de détection moyenne obtenue. de nombreux défis rencontrés lors de la formation des modèles. Comparé à d'autres détecteurs régionaux, notre modèle hybride offrait une plus grande précision et une vitesse de traitement supérieure, gérant 40 à 45 images par seconde avec une précision allant jusqu'à 93,6 %. Les couches d'intégration et de concaténation de profondeur ont amélioré la détection d'objets plus petits en incorporant des détails d'image de bas niveau dans le processus de détection, facilitée par une séquence de couches de convolution, ReLU et de normalisation par lots. L'application MATLAB fournit une plate-forme robuste pour étendre la recherche vers des applications futures. En termes de « faire face à l'inconnu » et à l'incertitude de la recherche, pour la communauté des chercheurs entreprenant des projets similaires sur une ou plusieurs années, il vaut la peine d'envisager des défis supplé

Machine Translated by Google

Ces considérations peuvent inclure des changements dans le personnel des partenaires industriels, d'éventuels confinements en cas de pandémie, un financement gouvernemental et des mises à jour des politiques, qui nécessitent une flexibilité dans la planification des projets et de la collecte de données.

Un résumé des aspects pratiques de cette étude est répertorié comme suit : • La technologie offre une solution automatisée rentable pour la circulation sur voie et en général.
sécurité, en augmentant mais pas en remplaçant les inspections humaines.

• Le système augmente la fréquence des inspections, améliore la confidentialité et permet la création d'enregistrements numériques pour des informations analytiques sur la sécurité routière.

• Les efforts scientifiques futurs utiliseront un ensemble de données plus étendu pour se concentrer sur le développement de modèles adaptatifs et l'amélioration des performances. Des visualisations de données supplémentaires et des approches méthodologiques hybrides seront explorées.

• Pour notre partenaire industriel, la NZTA, le projet ouvre la voie au développement indépendant de logiciels et à l'intégration potentielle de systèmes dans des infrastructures plus larges de villes intelligentes .

• La transition d'un produit minimum viable (MVP) vers des systèmes de production impliquera des tests approfondis, une optimisation du code et, potentiellement, une transition de MATLAB vers Python pour améliorer les capacités d'intégration de l'efficacité informatique et minimiser la possibilité de verrouillage des fournisseurs dans des infrastructures et un traitement de données propriétaires. en dehors de la juridiction nationale.

• Cette étude jette les bases des innovations futures en matière de technologie de gestion du trafic , positionnant la NZTA pour tirer parti des progrès réalisés dans sa modernisation continue des infrastructures de circulation et ses initiatives de ville intelligente.

Les futures avancées du système envisageront de permettre le suivi de l'état des broches à partir de divers points de vue, y compris potentiellement des protocoles et des technologies supplémentaires de collecte de données, élargissant ainsi la polyvalence et la portée des applications du système.

5. Conclusions et travaux futurs

Le pont du port d'Auckland joue un rôle crucial dans l'infrastructure d'Auckland, avec des flux de trafic inégaux mais prévisibles, s'inversant en volume aux heures de pointe du matin et du soir. Les barrières mobiles en béton (MCB) se sont révélées efficaces pour gérer les goulots d'étranglement du trafic sur de courtes distances ; cependant, la sensibilité du pont à divers types de vibrations, en particulier autour de sa partie centrale surélevée, soulève des problèmes de sécurité, nécessitant des inspections fréquentes des axes. D'autres problèmes de santé et de sécurité incluent le recours exclusif aux inspections manuelles et le potentiel d'erreurs humaines liées à la sécurité du personnel d'inspection sur le lieu de travail, une posture ergonomique malsaine de la colonne vertébrale et des problèmes avec les équipements de protection.

Pour augmenter la sécurité et la fréquence de surveillance de la sécurité du MCB, nous avons développé un système de surveillance automatisé préservant la confidentialité qui est transférable des données collectées sur le pont du port d'Auckland à des contextes similaires impliquant des applications de régulation de la circulation et de surveillance de la sécurité [10]. Une nouvelle technique de génération de cadres synthétiques a été introduite pour simuler diverses positions de broches dangereuses, facilitant ainsi le développement incrémentiel de modèles et le réglage des performances. Cette recherche a démontré avec succès que le prototype peut détecter les positions de broches dangereuses directement à partir de flux en direct et d'images vidéo précédemment enregistrées dans diverses conditions d'éclairage (telles qu'un soleil éclatant, de fortes pluies et des conditions de lumière « douce » tôt le matin). La rareté des images vidéo affichant un statut Pin_Out a été résolue en introduisant une méthode de création d'images synthétiques pour améliorer le processus de modélisation. Les performances globales attendues du système en matière de détection de régions de broches, de sélection de trames et de classification de broches devaient être supérieures à 80 %, les modèles individuels atteignant une précision allant jusqu'à 99 % sur un ensemble de données limité, comme le montre le tableau 5. Ces résultats justifient une validation plus approfondie sur un ensemble de données futur plus vaste et plus équilibré. Le système de détection et d'alerte de l'état des broches a fait preuve d'une précision et d'une exactitude souhaitables, avec une certaine baisse de performances attribuée à la nature déséquilibrée de l'ensemble de données, aux diverses conditions d'éclairage, ainsi qu'aux angles de caméra et aux variations de distance. Les preuves provenant d'un ensemble de données étiquetées plus petit suggèrent que le système est un produit viable qui ne nécessite pas de mesures plus intensives.

Machine Translated by Google

étiquetage manuel. L'intégration d'un modèle hybride a facilité l'analyse et apporté de la flexibilité pour les futurs ajustements du modèle avec des exigences minimales d'étiquetage des données.

Les travaux futurs comprendront une collecte plus approfondie de données vidéo, y compris des vidéos supplémentaires enregistrées par les équipes de maintenance de la NZTA et de l'AHB. La collecte de données améliorée est devrait renforcer le système fondamental et aider à développer davantage les systèmes ARDAD universellement applicables pour des contextes de sécurité routière similaires à l'échelle mondiale. Alors que l'état du code PIN les résultats de détection et de classification sont prometteurs, il existe un potentiel important pour progrès dans l'intégration du suivi du retour sur investissement des broches avec le système d'alerte. Itérations futures du système peut également tirer parti de technologies avancées telles que le LiDAR et le GPS, qui sont de plus en plus courants sur les appareils mobiles modernes. Développer des les capacités impliqueront une formation approfondie du système et une adaptation sur des ensembles de données enrichis qui capturent diverses conditions et scénarios de broches, conduisant potentiellement à des solutions réactives de gestion du trafic.

Contributions de l'auteur : Conceptualisation, MR ; Logiciel, MR ; Validation, MR ; Conservation des données, M; Rédaction – ébauche originale, MR ; Rédaction – révision et édition, BB et MD ; Supervision, BB et MD Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : ensemble de données disponible sur demande auprès des auteurs.

Remerciements : Nous adressons nos sincères remerciements à Gary Bonser, Martin Olive, David Ranby, et Angela Potae de la NZTA et d'Auckland System Management (ASM) pour leurs précieux assistance au transport, briefings de sécurité, enregistrements vidéo, informations sur le projet et soutien continu. Nous remercions également l'Université de technologie d'Auckland (AUT) pour son financement et son allocation de doctorat. support et pour fournir l'accès au matériel informatique, à la bibliothèque et à l'équipement d'enregistrement. Nous souhaitons également reconnaître les efforts de documentation et de développement de logiciels de l'industrie, le monde universitaire et les communautés open source produisant MATLAB, Orange Data-Mining, SqueezeNet, TensorFlow, ImageNet, Google Cloud et OpenCV.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Notations

Le tableau suivant résume les symboles importants et les notations mathématiques utilisés dans ce papier:

Symbole	Description
Oui	Composante de luminance dans l'espace colorimétrique YCbCr
xc	Emplacement centroïde d'un objet dans la correspondance de modèle
xi	Emplacement des pixels dans la correspondance de modèle
Wi	Intensité des pixels dans la correspondance de modèles
P(Xt)	Probabilité d'observer une valeur de pixel X au temps t dans un modèle de mélange gaussien
	Poids de la k-ième composante gaussienne au temps t
	Moyenne de la k-ième gaussienne au temps t
sem,t μk,t ∑k,t	Matrice de covariance de la k-ième gaussienne au temps t
ΔMt	Métrique de détection de mouvement combinant les différences de trame et le flux optique
	Image au temps t
Ft It	Dégradé de l'image au temps t
Vermont	Vecteur de flux optique au temps t
α	Facteur de pondération dans l'équation de détection de mouvement
Kk	Gain de Kalman au temps k
zk	Mesure réelle au temps k
Hong Kong	Matrice de mesure qui mappe l'espace d'état dans l'espace de mesure

Machine Translated by Google

Les références

1. Agence néo-zélandaise des transports Waka Kotahi. Fiche d'information sur le pont du port d'Auckland. 2024. Disponible en ligne : https://www.nzta. govt.nz/assets/site-resources/content/about/docs/auckland-harbour-bridge-factsheet.pdf (consulté le 10 avril 2024).
2. Commission des infrastructures de Te Waihanga en Nouvelle-Zélande. Valeur, investissement et amortissement des actifs d'infrastructure de la Nouvelle-Zélande, 1990-2022. 2023. Disponible en ligne : https://tewaihanga.govt.nz/our-work/research-insights/build-or-maintain (consulté le 10 avril 2024).
3. Agence néo-zélandaise des transports Waka Kotahi. Comment déplacer une barrière d'autoroute en béton. 2024. Disponible en ligne : https : //www.nzta.govt.nz/media-releases/how-to-move-a-concrete-motorway-barrier/ (consulté le 10 avril 2024).
4. Yang, X. ; Zhang, J. ; Liu, W. ; Jing, J. ; Zheng, H. ; Xu, W. Automatisation de la détection, du diagnostic et du traitement des détresses routières. J. Ing. routier. 2024, 4, 1–26. [Référence croisée]
5. Bai, D. ; Li, G. ; Jiang, D. ; Yun, J. ; Tao, B. ; Jiang, G. ; Soleil, Y. ; Ju, Z. Méthodes de détection des défauts de surface pour les produits industriels avec des échantillons déséquilibrés : un bilan des progrès réalisés dans les années 2020. Ing. Appl. Artif. Intell. 2024, 130, 107697. [Réf. croisée]
6. Trilles, S. ; Hammad, SS ; Iskandaryan, D. Détection d'anomalies basée sur l'intelligence artificielle des objets : une cartographie systématique de la littérature. Objets Internet 2024, 25, 101063. [CrossRef]
7. Ba˘ci´c, B. ; Rathee, M. ; Pears, R. Automatisation de l'inspection des barrières de voie mobiles pour la sécurité routière du pont du port d'Auckland. Dans Actes du traitement de l'information neuronale : 27e conférence internationale, ICONIP 2020, Bangkok, Thaïlande, 23-27 novembre 2020 ; Actes, partie I 27. Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020 ; pp. 150-161.
8. Klarak, J. ; Andok, R. ; Malik, P. ; Kuric, moi.; Ritomský, M. ; Kla˘cková, I. ; Tsai, H.-Y. De la détection des anomalies à la classification des défauts. Capteurs 2024, 24, 429. [CrossRef] [Pub Med]
9. Lozano-Ramirez, NE ; Sánchez, O. ; Carrasco-Beltran, D. ; Vidal-Méndez, S. ; Castañeda, K. Numérisation et durabilité dans tendances des projets linéaires : une analyse bibliométrique. Durabilité 2023, 15, 15962. [CrossRef]
10. Wikipédia. Machine de transfert de barrière. 2024. Disponible en ligne : https://en.wikipedia.org/wiki/Barrier_transfer_machine (accédé le 20 avril 2024).
11. Rathee, M. Contrôle de sécurité de la barrière en béton mobile du Harbour Bridge d'Auckland ; Université de technologie d'Auckland : Auckland, Nouvelle-Zélande, 2021.
12. Baccari, S. ; Hadded, M. ; Ghazzai, H. ; Touati, H. ; Elhadef, M. Détection d'anomalies dans les véhicules connectés et autonomes : une enquête, une analyse et des défis de recherche. Accès IEEE 2024, 12, 19250-19276. [Référence croisée]
13. Rathee, M. ; Ba˘ci´c, B. ; Doborjeh, M. Détection automatisée des défauts routiers et des anomalies pour la sécurité routière : une revue systématique. Capteurs 2023, 23, 5656. [CrossRef] [Pub Med]
14. Cui, Y. ; Liu, Z. ; Lian, S. Une enquête sur les algorithmes de détection d'anomalies non supervisés pour les images industrielles. Accès IEEE 2023, 11, 55297-55315. [Référence croisée]
15. Cottrell, BH Évaluation d'un système de barrière mobile en béton. [Tech Report] 1994. Disponible en ligne : https://rosap.ntl.bts.gov/vue/point/19352 (consulté le 9 avril 2024).
16. Poe, CM Approche de barrière mobile en béton pour la conception et l'exploitation d'une voie VOM à contre-courant. Transp. Rés. Rec. 1991, 40-54.
17. Chirayil Nandakumar, S. ; Mitchell, D. ; Erden, MS ; Flynn, D. ; Lim, T. Méthodes de détection d'anomalies en robotique autonome missions. Capteurs 2024, 24, 1330. [CrossRef]
18. Galvão, YM; Castro, L. ; Ferreira, J. ; Neto, FBdL ; Fagundes, RAdA; Fernandes, BJ Détection d'anomalies dans les maisons intelligentes pour les soins de santé : avancées récentes et perspectives d'avenir. SN Calcul. Sci. 2024, 5, 136. [Réf. croisée]
19. Es-Swidi, A. ; Ardchir, S. ; Elghoumari, Y. ; Daïf, A. ; Azouazi, M. Détection des embouteillages et des anomalies routières à l'aide du traitement des images de vidéosurveillance, défis et opportunités. Lors de la Conférence internationale sur les systèmes intelligents avancés pour le développement durable ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2022 ; pp. 92-105.
20. Gao, J. ; Zuo, F. ; Ozbay, K. ; Hammami, O. ; Barlas, ML Une nouvelle approche de surveillance des voies de trottoir et d'estimation de l'impact du stationnement illégal basée sur la théorie des files d'attente et la vision par ordinateur pour les caméras à faible résolution et à faible fréquence d'images. Transp. Rés. Partie A, pratique politique. 2022, 162, 137-154. [Référence croisée]
21. Kim, S. ; Anagnostopoulos, G. ; Barmpounakis, E. ; Geroliminis, N. Extensions visuelles et détection d'anomalies dans le pNEUMA expérimentez avec un essaim de drones. Transp. Rés. Partie C émergente. Technologie. 2023, 147, 103966. [Réf. croisée]
22. Yi, K. ; Luo, K. ; Chen, T. ; Hu, R. Un modèle YOLOX amélioré et une stratégie de transfert de domaine pour les piétons et les véhicules nocturnes détection. Appl. Sci. 2022, 12, 12476. [CrossRef]
23. Wang, J. ; Wang, X. ; Hao, R. ; Yin, H. ; Huang, B. ; Xu, X. ; Liu, J. Correspondance incrémentale de voisinage de modèle pour la détection d'anomalies 3D. Neuroinformatique 2024, 581, 127483. [CrossRef]
24. Pan, Q. ; Bao, Y. ; Li, H. Transférer la détection des anomalies de données basée sur l'apprentissage pour la surveillance de l'état des structures. Structure. Surveillance de la santé. 2023, 22, 3077-3091. [Référence croisée]
25. Yan, P. ; Abdulkadir, A. ; Luley, P.-P. ; Rosenthal, M. ; Schatte, Géorgie ; Grewe, BF; Stadelmann, T. Une étude complète de l'apprentissage par transfert profond pour la détection d'anomalies dans les séries chronologiques industrielles : méthodes, applications et orientations. Accès IEEE 2024, 12, 3768-3789. [Référence croisée]
26. Bharambe, U. ; Bhangale, U. ; Narvekar, C. Rôle de l'optimisation multi-objectif dans la segmentation et la classification des images. En intelligence computationnelle dans le traitement de l'image et de la vidéo ; Chapman et Hall/CRC : Boca Raton, FL, États-Unis, 2023 ; pp. 317-340.
27. Gonzalez, traitement d'images numériques RC ; Pearson Education India : Hoboken, NJ, États-Unis, 2009.

Machine Translated by Google

28. Yuan, Y. ; Huang, J. ; Yu, J. ; Tan, JKS ; Chng, KZ; Lee, J. ; Kim, S. Application d'algorithmes d'apprentissage automatique pour une détermination précise du niveau de bilirubine sur des images fantômes de tissus modifiés in vitro. Sci. Rep.2024 , 14, 5952. [CrossRef] [Pub Med]
29. Kilicaslan, M. ; Tanyeri, U. ; Demirci, R. Récupération d'images à l'aide d'un histogramme de couleurs unidimensionnel créé avec entropie. Av. Electr. Calculer. Ing. 2020, 20, 79-88. [Référence croisée]
30. Mittal, H. ; Pandey, AC; Saraswat, M. ; Kumar, S. ; Pal, R. ; Modwel, G. Une étude complète de la segmentation d'images : méthodes de clustering, paramètres de performance et ensembles de données de référence. Multimed. Outils Appl. 2022, 81, 35001-35026. [Référence croisée]
31. Vansh, V. ; Chandrasekhar, K. ; Anil, C. ; Sahu, SS Amélioration de la détection des visages à l'aide de YCbCr et Adaboost. Dans Actes de la 5e Conférence internationale sur l'intelligence computationnelle dans l'exploration de données (ICCIDM 2018), Burla, Inde, 15-16 décembre 2018 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020 ; pp. 689-699.
32. Han, H. ; Han, C. ; Lan, T. ; Huang, L. ; Hu, C. ; Xue, X. Détection automatique des ombres pour la télédétection multispectrale par satellite images dans des espaces colorimétriques invariants. Appl. Sci. 2020, 10, 6467. [Réf. croisée]
33. Sahu, Y. ; Tripathi, A. ; Gupta, RK ; Gautam, P. ; Pateriya, RK ; Gupta, A. Un diagnostic assisté par ordinateur du cancer du sein basé sur CNN-SVM utilisant la technique de segmentation de l'histogramme K-means. Multimed. Outils Appl. 2023, 82, 14055-14075. [Référence croisée]
34. Kollem, S. ; Reddy, KR ; Rao, DS Un algorithme de regroupement de moyennes floues possibilistes optimisé basé sur SVM pour la segmentation des tumeurs . Multimed. Outils Appl. 2021, 80, 409-437. [Référence croisée]
35. Agrawal, S. ; Natu, P. Un modèle de soustraction d'arrière-plan basé sur la méthode de mélange gaussien amélioré pour la détection d'objets en mouvement dans une scène extérieure. Dans Actes de la quatrième Conférence internationale 2021 sur les technologies électriques, informatiques et de communication (ICECCT), Coimbatore, Inde, 15-17 septembre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 8.
36. Rakesh, S. ; Hegde, NP; Gopalachari, MV ; Jayaram, D. ; Madhu, B. ; Hameed, MA ; Vankdothu, R. ; Kumar, LS Objet en mouvement détection à l'aide d'une soustraction d'arrière-plan basée sur le GMM modifié. Mesures. Sens.2023 , 30, 100898. [CrossRef]
37. Zhou, Q. ; Situ, Z. ; Teng, S. ; Chen, G. Efficacité comparative de l'augmentation des données à l'aide d'approches traditionnelles par rapport aux StyleGAN dans la détection automatisée des défauts des égouts. J. Ressource en eau. Plan. Gérer. 2023, 149, 04023045. [Réf. croisée]
38. Zuehlke, D. ; Henderson, TA; McMullen, S. Apprentissage automatique utilisant la correspondance de modèles appliqué au suivi d'objets dans les données vidéo. Artif. Intell. Mach. Apprendre. Exploitation multi-domaines. Appl. 2019, 11006, 110061S.
39. Ge, Y. ; Zhang, J. ; Ren, X. ; Zhao, C. ; Yang, J. ; Basu, A. Réseau de transformation à variation profonde pour la détection du premier plan. IEEETrans. Système de circuits. Technologie vidéo. 2020, 31, 3544-3558. [Référence croisée]
40. Cao, Q. ; Wang, Z. ; Long, K. Détection de l'avant-plan du trafic aux intersections urbaines complexes à l'aide d'un nouveau modèle d'apprentissage de dictionnaire en arrière-plan. J.Adv. Transp. 2021, 2021, 3515512. [CrossRef]
41. Zhang, Y. ; Zheng, W. ; Leng, K. ; Li, H. Soustraction d'arrière-plan utilisant une fonction de texture médiane locale adaptative en illumination change les scènes de circulation urbaine. Accès IEEE 2020, 8, 130367-130378. [Référence croisée]
42. Feng, J. ; Zeng, D. ; Jia, X. ; Zhang, X. ; Li, J. ; Liang, Y. ; Jiao, L. Réseaux multi-images basés sur des points clés et guidés par des informations sur les mouvements spatiaux pour la détection et le suivi des véhicules en mouvement dans les vidéos satellite. ISPRS J. Photogramme. Télésens. 2021, 177, 116-130. [Référence croisée]
43. Yang, G. ; Ramanan, D. Mise à niveau du flux optique vers un flux de scène 3D grâce à l'expansion optique. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes 2020, Seattle, WA, États-Unis, 13-19 juin 2020 ; pages 1334 à 1343.
44. Chen, X. ; Jia, Y. ; Tong, X. ; Li, Z. Recherche sur la détection des piétons et le suivi du tri en profondeur devant un véhicule intelligent basé sur l'apprentissage profond. Durabilité 2022, 14, 9281. [CrossRef]
45. Soleil, M. ; Davies, MOI ; Proudler, IK ; Hopgood, JR Filtre de Kalman à noyau adaptatif. IEEETrans. Processus de signal. 2023, 71, 713-726. [Référence croisée]
46. Chaurasiya, RK ; Gondane, PM ; Acharya, B. ; Khan, MI Analyseur automatique du trafic routier utilisant des algorithmes de soustraction d'arrière-plan, d'analyse de taches et de suivi. Dans les actes de la 7e Conférence internationale 2023 sur les applications informatiques en génie électrique – Progrès récents (CERA), Roorkee, Inde, 27-29 octobre 2023 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2023 ; p. 1 à 6.
47. Sajeed, MA; Kelouwani, S. ; Amamou, A. ; Alam, Maryland ; Agbossou, K. Estimation de la sortie de voie des véhicules sur les routes urbaines à l'aide d'informations SIG. Dans les actes de la conférence IEEE sur la puissance et la propulsion des véhicules (VPPC) 2021, Gijon, Espagne, 25-28 octobre 2021 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2021 ; p. 1 à 7.
48. Momin, KA; Barua, S. ; Jamil, MS ; Hamim, OF Prédiction du flux de trafic de courte durée à l'aide du filtrage de Kalman. AIP Conf. Proc. 2023, 2713, 040011.
49. Moghaddasi, SS ; Faraji, N. Un algorithme hybride basé sur un filtre à particules et un algorithme génétique pour le suivi de cibles. Système expert. Appl. 2020, 147, 113188. [Réf. croisée]
50. Chen, S. ; Huang, L. ; Chen, H. ; Bai, J. Détection et suivi multivoies à l'aide d'un modèle spatio-temporel et d'un filtrage de particules. IEEETrans . Intell. Transp. Système. 2021, 23, 2227-2245. [Référence croisée]
51. Nissimagoudar, P. ; Algur, N. ; Bonageri, N. ; Chavan, A. ; Koppa, A. ; Iyer, Caroline du Nord Suivi de plusieurs véhicules à l'aide d'un algorithme de déplacement moyen et d'une connectivité à 8 points. Dans Actes de la Conférence internationale sur le soft computing et la reconnaissance de formes, en ligne, 14-16 décembre 2022 ; Springer : Berlin/ Heidelberg, Allemagne, 2022 ; p. 3-13.
52. Zhang, B. ; Li, Z. ; Perina, A. ; Del Bue, A. ; Murino, V. ; Liu, J. Modélisation adaptative du mouvement local pour un suivi robuste des objets. IEEE Trans. Système de circuits. Technologie vidéo. 2016, 27, 1515-1526. [Référence croisée]
53. O'Mahony, N. ; Campbell, S. ; Carvalho, A. ; Harapanahalli, S. ; Hernández, GV ; Krpalkova, L. ; Riordan, D. ; Walsh, J. Apprentissage profond vs vision par ordinateur traditionnelle. Dans Actes de Advances in Computer Vision : 2019 Computer Vision Conference (CVC), Las Vegas, NV, États-Unis, 2 et 3 mai 2019 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020 ; Volume 1, p. 128-144.

Machine Translated by Google

54. Zhang, W. ; Li, H. ; Li, Y. ; Liu, H. ; Chen, Y. ; Ding, X. Application des algorithmes d'apprentissage profond en ingénierie géotechnique : un bref revue critique. Artif. Intell. Rév.2021 , 54, 5633-5673. [Référence croisée]
55. Long, G. ; Zhang, Z. Détection du trafic chiffré en profondeur : un cadre de détection des anomalies pour le trafic chiffré basé sur le parallèle extraction automatique des fonctionnalités. Calculer. Intell. Neurosci. 2023, 3316642. [Réf. croisée] [Pub Med]
56. Fesses, UM ; Ullah, HA ; Letchmunan, S. ; Tariq, moi.; Hassan, FH; Koh, TW Tirer parti de l'apprentissage par transfert pour l'humain spatio-temporel reconnaissance d'activité à partir de séquences vidéo. Calculer. Maître. Continuer. 2023, 74, 5017-5033.
57. Ouhami, M. ; Hafiane, A. ; Es-Saady, Y. ; El Hajji, M. ; Canals, R. Vision par ordinateur, IoT et fusion de données pour la détection des maladies des cultures utiliser l'apprentissage automatique : une enquête et des recherches en cours. Remote Sens.2021 , 13, 2486. [CrossRef]
58. Carlson, député; Bloom, I. La nature cyclique de la résolution de problèmes : un cadre de résolution de problèmes multidimensionnel émergent. Éduc. Goujon. Mathématiques. 2005, 58, 45-75. [Référence croisée]
59. Vallenga, D. ; Grypdonck, MHF; Hoogwerf, LJR; Tan, FIY Recherche-action : quoi, pourquoi et comment ? Acta Neurol. Belge. 2009, 109, 81-90. [Pub Med]
60. Farady, moi ; Lin, CY ; Chang, M.-C. PreAugNet : améliorez l'augmentation des données pour la classification des défauts industriels avec des données de formation à petite échelle . J. Intell. Fab. 2024, 35, 1233-1246. [Référence croisée]
61. Xu, M. ; Yoon, S. ; Fuentes, A. ; Park, DS Une étude complète des techniques d'augmentation d'image pour l'apprentissage en profondeur. Reconnaissance de modèles . 2023, 137, 109347. [Réf. croisée]
62. Travaux mathématiques. Développez des applications à l'aide d'App Designer. 2021. Disponible en ligne : https://www.mathworks.com/help/matlab/app-concepteur.html (consulté le 10 avril 2024).
63. Kingma, DP; Ba, J. Adam : Une méthode d'optimisation stochastique. arXiv 2014, arXiv : 1412.6980.
64. Sutskever, I. ; Martens, J. ; Dahl, G. ; Hinton, G. Sur l'importance de l'initialisation et de l'élan dans l'apprentissage profond. Dans Actes de la Conférence internationale sur l'apprentissage automatique, Atlanta, Géorgie, États-Unis, 16-21 juin 2013 ; PMLR; pages 1139 à 1147.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Commentaire

Commentaire sur Sakli, H. Guide d'ondes cylindrique sur substrat de ferrite contrôlé par un champ magnétique appliqué de manière externe. Électronique 2021, 10, 474

Afshin Moradi

Département d'ingénierie physique, Université de technologie de Kermanshah, Kermanshah 6715685420, Iran ; a.moradi@kut.ac.ir

Résumé : Récemment, Sakli a étudié la propagation des ondes électromagnétiques dans des guides d'ondes cylindriques métalliques remplis de ferrite magnétisée longitudinalement, en se concentrant sur les modes TEz (électrique transversal) et TMz (magnétique transversal) par rapport à l'axe z. Ce commentaire souligne que le système proposé ne peut généralement pas prendre en charge la propagation des ondes TEz et TMz , rendant invalides les principaux résultats dérivés de Sakli.

Mots clés : matériaux anisotropes ; antenne; guides d'ondes cylindriques ; ferrites; propagation

1. Introduction

Récemment, Sakli [1] a étudié la propagation des modes TEz et TMz dans des guides d'ondes cylindriques métalliques remplis de ferrite sans perte et magnétisée longitudinalement. Il a montré comment obtenir des diagrammes de dispersion et discuté de l'impact des paramètres anisotropes sur les caractéristiques de dispersion et les fréquences de coupure. De plus, il a présenté des résultats numériques pour les modes TEz et TMz .

Cependant, sur la base de la théorie des guides d'ondes cylindriques remplis de ferrite obtenue au début des années 50 du siècle dernier [2,3], l'onde hybride devrait être attendue pour la propagation du guide d'ondes cylindrique métallique proposée, et donc les ondes TEz et TMz sont incapable de se propager. De plus, comme le montre notre récente étude [4], un guide d'onde cylindrique métallique rempli de matériaux anisotropes homogènes ne prend généralement en charge que les modes hybrides. Cela signifie que les résultats mentionnés ci-dessus pour la propagation des modes TEz et TMz dérivés de Sakli [1] ne sont pas valides. Notons qu'il a également été bien établi que dans les cas généraux, la séparation des ondes électromagnétiques en modes TE et TM n'est pas possible dans les guides d'ondes rectangulaires métalliques [5,6].

Nous pensons que les publications incorrectes doivent être corrigées pour garantir que les nouveaux chercheurs puissent s'appuyer sur des études antérieures précises. Cette motivation motive notre commentaire, dans lequel nous identifions les erreurs dans [1].

2. L'analyse électromagnétique rigoureuse

Considérons un guide d'ondes cylindrique métallique rempli de ferrite magnétisée longitudinalement, comme le montre la figure 1 de [1]. Nous nous intéressons aux solutions en mode guidé dans le guide d'onde se propageant dans la direction z. Considérons donc la forme de l' onde électromagnétique se propageant dans le guide d'onde comme

$$E(r, \theta, z, t) = E(r, \theta)e^{j(\omega t - kz z)} \quad , \tag{1}$$

$$H(r, \theta, z, t) = H(r, \theta)e^{j(\omega t - kz z)} \quad , \tag{2}$$

check for updates

Citation : Moradi, A. Commentaire sur Sakli, H. Guide d'ondes cylindrique sur substrat de ferrite contrôlé par un champ magnétique appliqué de manière externe. Électronique 2021, 10, 474. Électronique 2024, 13, 3031. https://doi.org/10.3390/électronique13153031

Rédacteur académique : Flavio Canavero

Reçu : 9 mai 2024
Révisé : 11 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Droit d'auteur : © 2024 par l'auteur. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

où kz est la constante de propagation le long de la direction z. En développant les équations de Maxwell curl (c'est-à-dire les équations (1) et (2) dans [1]) et en utilisant l'équation (3) dans [1], nous obtenons

$$\begin{matrix} \frac{1}{r}\frac{\partial Ez}{\partial \theta} - \frac{\partial E\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial Er}{\partial z} - \frac{\partial Ez}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial (rE\theta)}{\partial r} - \frac{\partial Er}{r\partial \theta}\frac{1}{} \end{matrix} \quad -j\omega\mu_0 \quad = \quad \begin{matrix} \mu Hr - j\kappa H\theta \\ j\kappa Hr + \mu H\theta \\ \mu_{rz} Hz \end{matrix} \quad , \tag{3}$$

$$\begin{matrix} \frac{1}{r}\frac{\partial Hz}{\partial \theta} - \frac{\partial H\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial Hr}{\partial z} - \frac{\partial Hz}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial (rH\theta)}{\partial r} - \frac{\partial Hr}{r\partial \theta} \end{matrix} \quad = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \quad \begin{matrix} Euh \\ E\theta \\ Ez \end{matrix} \quad . \tag{4}$$

En mettant les équations (1) et (2) dans les équations (3) et (4), et en effectuant quelques manipulations, nous obtenons

$$Euh = \frac{kz}{K_c^2}\left[-jK_2\left[\frac{\partial Ez}{\partial \theta}\frac{1}{r} + \frac{\partial Ez}{\partial r}\right] - \frac{1}{K_c^2}\left[A_1 + jA_2\right]\left[\frac{\partial Hz}{\partial r}\frac{1}{r} + \frac{\partial Hz}{\partial \theta}\right]\right], \tag{5}$$

$$E\theta = -\left[\frac{kz}{K_c^2}\left[\frac{\partial Ez}{\partial r} + jK_2\left[\frac{1}{c_{\mu r}}\frac{\partial Ez}{\partial \theta} + \frac{1}{K_c^2}\left[\frac{\partial Hz}{\partial r}\frac{1}{r} + \frac{\partial Hz}{\partial \theta}jA_2 - A_1\right]\right]\right]\right], \tag{6}$$

$$Heure = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r f}{K_c^2}\left[\frac{\partial Ez}{\partial r} + jK_2\left[\frac{1}{c_{\mu r}}\frac{\partial Ez}{\partial \theta} - \frac{1}{K_c^2}\left[jkzK\left[\frac{2}{c_\mu}\frac{\partial Hz}{\partial r}\frac{\partial Hz}{\partial \theta}\frac{1}{r} - Fkz\right]\right]\right]\right], \tag{7}$$

$$H\theta = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r f}{K_c^2}\left[-jK_2\left[c_\mu\frac{\partial Ez}{\partial r}\frac{\partial Ez}{\partial \theta}\frac{1}{r} + F\right] - \frac{1}{K_c^2}\left[Fkz\frac{\partial Hz}{\partial r} + jkzK\left[\frac{2}{c_{\mu r}}\frac{\partial Hz}{\partial \theta}\right]\right]\right], \tag{8}$$

où certains symboles sont introduits par commodité, à savoir les suivants :

$$\begin{aligned} K_{c\mu}^2 &= \varepsilon_r k_0^2\mu - k_z^2, \\ F &= \varepsilon_r f_0^2 k^2, \\ K_c^4 &= K^2 - F c_\mu, \\ A_1 &= \frac{Fk_z^2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r f}, \\ A_2 &= \frac{K_c^2 + k_z^2 K_{c\mu}^2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r f}. \end{aligned} \tag{9}$$

Nous rappelons au lecteur que les autres paramètres des équations utilisées dans ce travail ont été définis dans la référence [1]. Notez que les composantes longitudinales satisfont aux équations couplées suivantes :

$$\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{\partial \theta 2}\right]\frac{2\omega\mu_0\mu_{rz}K + \partial\theta 2}{A_2}Hz = -j\left[\frac{kzF}{A_2}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{2\,\partial\theta 2}\right]\right]Euh, \tag{dix}$$

$$\left[\frac{1}{\partial r}\frac{\partial}{r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{\partial\theta 2} + \frac{K_c^2}{K2c_\mu}\right]Ez = \frac{jFkz}{K2\,c_\mu\omega\varepsilon_0\varepsilon_r f}\left[\frac{1}{\partial r}\frac{\partial}{r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{2\,\partial\theta 2}\right]Hz, \tag{11}$$

de sorte qu'en général, un mode hybride est nécessaire. Notez que les membres droits des équations (10) et (11) ont été négligés dans l'analyse de Sakli [1] ; par conséquent, sa déclaration selon laquelle les modes TEz et TMz peuvent être pris en charge séparément dans un guide d'ondes cylindrique métallique rempli de ferrite magnétisée longitudinalement est incorrecte.

Cependant, le découplage de Ez, de Hz se produit dans deux cas particuliers. Dans le premier cas, les équations (10) et (11) peuvent être séparées en deux équations indépendantes de Ez et Hz, lorsque l'aimantation est égale à zéro, c'est à dire lorsque l'on a

$$\kappa = 0. \tag{12}$$

Machine Translated by Google

Dans ce cas, les équations (10) et (11) deviennent

$$\frac{1}{}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{2}\frac{\partial}{r}\frac{2\,\mu rz+\partial\theta 2}{\mu}+\left(k_0^2\mu-k\,\varepsilon r\right)f_z^2\,Hz=0, \tag{13}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial r}{\partial r}\right)+\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{r}\left(k_0^2\mu-k+\varepsilon r\right)f_{\partial\theta 2}\,\frac{2}{z}\,Ez=0, \tag{14}$$

et par conséquent, les modes TEz et TMz peuvent être pris en charge séparément dans un guide d'ondes cylindrique métallique rempli de ferrite « non magnétisée » longitudinalement. Dans le second cas, le découplage se produit si l'on considère les modes azimutaux, c'est-à-dire lorsque l'on a

$$kz=0. \tag{15}$$

En mettant la constante de propagation égale à zéro dans les équations (10) et (11), on obtient

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{2}\frac{\partial}{r}\frac{\partial}{2\,\partial\theta 2}+\varepsilon r\,f\,\mu rzk_0^2\,Hz=0, \tag{16}$$

$$\frac{1}{}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{2}\frac{\partial}{r}\frac{2\,\varepsilon r\,f+}{\partial\theta 2\,\mu}\,\mu^{2}\,2-\kappa\,2k0\,Ez=0. \tag{17}$$

Dans ce cas, les modes TEz et TMz avec composantes (Hz, Er , Eθ) et (Ez, Hr , Hθ) apparaissent respectivement.

3. Conclusions

Dans ce travail, nous avons commencé par utiliser le cadre mathématique général expliquant comment les ondes électromagnétiques se déplacent à travers un guide d'ondes cylindrique métallique rempli d'un matériau de ferrite magnétisé sur toute sa longueur (comme indiqué dans les références [2] et [3]). Notre analyse a démontré que, dans la plupart des situations, ce type de système ne permet pas la séparation distincte des modes TEz et TMz . Il n'existe que deux scénarios particuliers dans lesquels cette séparation pourrait se produire. En conséquence, les principales conclusions présentées par Sakli dans la référence [1] sont invalides.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les données qui étayent les conclusions de cette étude sont disponibles dans l'article.

Conflits d'intérêts : L'auteur ne déclare aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Sakli, H. Guide d'ondes cylindrique sur substrat de ferrite contrôlé par un champ magnétique appliqué de manière externe. Électronique 2021, 10, 474. [Référence croisée]
2. Kales, modes ML dans des guides d'ondes contenant des ferrites. J.Appl. Phys. 1953, 24, 604. [Réf. croisée]
3. Gamo, H. La rotation de Faraday des ondes dans un guide d'ondes circulaire. J. Phys. Soc. Jpn. 1953, 8, 176. [Réf. croisée]
4. Moradi, A. ; Bait-Suwailam, MM Commentaire sur : Couplage amélioré de la lumière provenant de sources sub-longueur d'onde dans un signal hyperbolique. fibre métamatérielle. J. Lumière. Technologie. 2024, 42, 5435-5436. [Référence croisée]
5. Moradi, A. Commentaire sur les guides d'ondes chargés en métamatériaux contrôlables prenant en charge les ondes vers l'arrière et vers l'avant. IEEETrans. Propag. d'antennes. 2023, 72, 3858-3859. [Référence croisée]
6. Moradi, A. ; Bait-Suwailam, MM Ondes magnétostatiques dans des guides d'ondes rectangulaires métalliques remplis de milieux à perméabilité négative uniaxiale. J.Appl. Phys. 2024, 135, 153102. [Réf. croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Identification du type de pylône électrique et paramètre caractéristique Calcul à partir des données LiDAR aéroportées

Sheng Xuan Zu 1,2, Linong Wang 1,2,*, Shaocheng Wu 1,2, Guanjian Wang 1,2 et Bin Song 1,2

1 Centre de recherche en ingénierie du ministère de l'Éducation pour la protection contre la foudre et la technologie de mise à la terre, École de génie électrique et d'automatisation, Université de Wuhan, Wuhan 430072, Chine ; 2022202070038@whu.edu.cn (SZ) ; wushaocheng@whu.edu.cn (SW); wangguanjian@whu.edu.cn (GW) ; 00007609@whu.edu.cn (BS)

2 École de génie électrique et d'automatisation, Université de Wuhan, Wuhan 430072, Chine * Correspondance : wangln@whu.edu.cn ; Tél. : +86-138-7120-8599

Résumé : La reconstruction de modèles tridimensionnels (3D) d'équipements électriques joue un rôle de plus en plus important dans l'avancement des réseaux électriques jumeaux numériques. Pour reconstruire un modèle de haute précision, il est crucial d'obtenir avec précision le type de pylône et les informations nécessaires sur ses paramètres avant la modélisation. Cette étude propose une méthode améliorée pour identifier les types de pylônes basée sur une mesure de similarité et un ensemble de données transformés linéairement. Cela commence par simplifier l'identification des nuages de points à l'aide de la courbe en forme de pylône. Par la suite, la ressemblance entre la courbe et ces courbes au sein de l'ensemble de données est évaluée à l'aide d'une mesure de similarité pour déterminer le type de pylône. Une nouvelle méthode est proposée pour calculer les paramètres caractéristiques des nuages de points de pylônes. Les caractéristiques de distribution horizontale et verticale des nuages de points de pylônes sont analysées pour identifier les positions de segmentation clés en fonction de leurs types. Les points caractéristiques sont dérivés des positions de segmentation clés pour calculer les paramètres caractéristiques. Enfin, les modèles 3D de pylônes sont reconstruits sur la base des valeurs calculées. Les résultats expérimentaux ont montré que, comparée à d'autres mesures de similarité, la distance de Hausdorff avait le meilleur effet en tant que mesure de similarité utilisant l'ensemble de données transformé linéairement, avec un score F d'évaluation global de 86,4 %. L'erreur relative maximale des paramètres calculés du pylône n'a pas dépassé 5%, confirmant la faisabilité

Mots-clés : LiDAR aéroporté ; pylône électrique ; mesure de similarité ; Reconstitution 3D

check for updates

Citation : Zu, S. ; Wang, L. ; Wu, S. ; Wang, G. ; Chanson, B. Type de pylône électrique Identification et caractéristique Calcul des paramètres depuis Airborne Données LiDAR. Électronique 2024, 13, 3032. https://doi.org/10.3390/électronique13153032

Rédacteur académique : Ahmed Abu-Siada

Reçu : 17 juin 2024
Révisé : 22 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Avec le développement rapide de l'économie nationale, la demande de sources d'énergie fondamentales comme l'électricité ne cesse d'augmenter . Les lignes de transport à haute tension, qui constituent une infrastructure essentielle pour le transport d'électricité sur de longues distances, jouent un rôle crucial dans le développement économique national et dans la production quotidienne [1-3]. Une surveillance et un entretien réguliers des corridors de transport d'électricité sont impératifs pour garantir le fonctionnement sûr et stable du système électrique. L'inspection traditionnelle des lignes de transmission est généralement effectuée par des inspecteurs de lignes qui inspectent visuellement ou avec des instruments portatifs les équipements électriques et identifient les dangers potentiels en fonction de leur expérience. Cependant, en raison de plusieurs contraintes et de l'absence de données tridimensionnelles (3D) le long des lignes, les inspections manuelles impliquent une charge de travail importante, une faible précision et des risques potentiels pour la sécurité, les rendant inadéquates pour répondre aux besoins d'inspection du

Ces dernières années, la technologie aéroportée de détection et de télémétrie par la lumière (LiDAR) a été largement utilisée dans les inspections de puissance car elle permet l'acquisition rapide et précise de nuages de points 3D denses dans les couloirs de transmission de puissance sans les limitations de la lumière et du terrain [8-10]. Composant essentiel des lignes de transmission, le pylône électrique joue un rôle central pour assurer la sécurité des lignes à haute tension. Le modèle 3D reconstruit du pylône peut fournir des données de base et un support de modèle pour effectuer une analyse de simulation multi-physique sur le terrain, simuler des scènes de travail réelles et guider la sélection de

Machine Translated by Google

méthodes opérationnelles. Par conséquent, il est nécessaire de développer une méthode précise et efficace pour extraire les informations sur les pylônes à partir de nuages de points pour la reconstruction de modèles 3D.

Actuellement, la recherche sur les nuages de points de pylônes se concentre principalement sur la segmentation des points de pylônes à partir des nuages de points collectés par LiDAR aéroporté [11-16]. Et il existe de nombreuses méthodes de reconstruction de pylônes basées sur des données de nuages de points, qui peuvent être classées comme basées sur les données [17], basées sur un modèle [10] et hybrides [18]. L'approche basée sur les données est généralement une stratégie ascendante. Il traite directement les données sans qu'il soit nécessaire de présupposer les caractéristiques de l'objet reconstruit. Han et coll. [17] ont proposé une méthode de modélisation du pylône électrique basée sur les données. Dans cette méthode, des nuages de points de pylônes électriques ont été localisés et extraits en utilisant les points de connexion des paires de lignes. Le modèle 3D du pylône électrique a été construit selon la caractéristique de ligne 3D obtenue à partir du suivi de contour d'image binaire. Cette méthode nécessite des données de haute qualité et il est difficile de reconstruire la structure du pylône lorsqu'il existe de nombreux points de bruit dans les nuages de points obtenus. Par rapport à l'approche basée sur les données, l'approche basée sur les modèles adopte une stratégie descendante et nécessite qu'une bibliothèque de modèles soit complétée à l'avance. Li et coll. [10] divisent le pylône en trois parties relativement simples : le pied, le corps et la tête. La tête a été reconstruite en recherchant le modèle correspondant dans la bibliothèque de modèles prédéfinis , et le corps a été reconstruit en calculant les lignes d'intersection des plans latéraux ajustés. L'expérience a suggéré que l'approche permettait de réaliser efficacement une modélisation 3D automatique de la tête et du corps du pylône. Cependant, la reconstruction du pied du pylône a nécessité une opération interactive. Puisqu'il est difficile de répondre aux exigences de reconstruction d'objets complexes en utilisant uniquement des méthodes basées sur les données ou basées sur des modèles, des méthodes hybrides combinant les deux méthodes ci-dessus ont été proposées. Le procédé adopte des stratégies appropriées en fonction de différentes exigences de modélisation structurelle, ce qui peut améliorer la précision de la modélisation. Zhou et coll. [18] ont divisé le pylône en tête et corps. Ils ont reconstruit le corps du pylône par une stratégie basée sur les données et la tête par une stratégie basée sur un modèle à l'aide d'une bibliothèque de modèles de tête 3D prédéfinie. Cette méthode peut reconstruire avec précision la structure originale du pylône, mais elle ne peut pas traiter efficacement les pylônes contenant des structures plus complexes.

Pour résoudre les problèmes liés aux méthodes de modélisation ci-dessus, les types de pylônes et les informations sur les paramètres nécessaires obtenues à partir des nuages de points 3D sont utilisés pour reconstruire les pylônes dans cet article.

Les méthodes existantes pour identifier les types de pylônes sont principalement classées en méthodes basées sur des règles et méthodes d'apprentissage automatique [19]. Pour la première méthode, les caractéristiques sont extraites des nuages de points des pylônes, puis les types de pylônes sont identifiés en fonction de la différence des caractéristiques. Qiao et coll. [20] ont superposé les nuages de points de tête de pylône , puis ont calculé le taux de remplissage vertical pour chaque couche individuelle. Ils ont classé les pylônes en deux types en fonction de la position de la couche présentant le taux de remplissage le plus élevé. Chen et coll. [21] ont segmenté les nuages de points de tête de pylône en fonction des caractéristiques de distribution des points , puis les ont projetés sur le plan Y0Z0 pour créer une image. L'image du contour de la tête du pylône a été acquise en intégrant la méthode de traitement d'image. Enfin, le type de pylône a été déterminé en fonction de la quantité de pixels dans le contour. Bien que les deux méthodes ci-dessus permettent de distinguer les pylônes, les types de pylônes pouvant être identifiés sont très limités. Silva F. et coll. [22] ont proposé une méthodologie de classification basée sur la similarité. Ils ont utilisé des mesures de distance des nuages de points pour mesurer la similarité entre les nuages de points de pylônes et les modèles de référence de base, obtenant ainsi une classification des pylônes basée sur les différence Cette méthode nécessite de traiter de grandes quantités de données et est sensible aux fluctuations de la densité des points d'échantillonnage. Pour la deuxième méthode, l'identification des types de pylônes est réalisée sur la base de l'algorithme d'apprentissage automatique. Zhou et coll. [18] ont d'abord défini une bibliothèque de modèles paramétrés en 3D de têtes de pylônes. Ensuite, les types de têtes de pylône ont été identifiés par l'algorithme de contexte de forme, et un algorithme de recuit simulé a été utilisé pour estimer les paramètres pertinents des têtes de pylône. Chen et coll. [23] ont extrait des caractéristiques basées sur des histogrammes d'élévation de points et une projection frontale, et ont finalement utilisé la méthode de classification Support Vector Machine (SVM) pour former et classer des échantillons vectoriels de caractéristiques de la

Machine Translated by Google

Un algorithme a été utilisé pour estimer les paramètres pertinents des têtes de pylônes. Chen et coll. [23] ont extrait des caractéristiques basées sur des histogrammes d'élévation de points et une projection frontale, et ont finalement utilisé la méthode de classification Support Vector Machine (SVM) pour former et classer des échantillons vectoriels de caractéristiques de la tête. Wang et coll. [24] ont projeté des points de contour intérieurs et extérieurs dans des images rastérisées pour extraire les caractéristiques de l'histogramme de gradient orienté (HOG). Ensuite, Wang et al. [24] a utilisé comme entrées dans le classificateur SVM pour l'identification du type. Cependant, lorsque l'algorithme traite des ensembles de données à grande échelle, la formation peut prendre plus de temps en raison de son classificateur SVM plus élevé pour l'identification du type. Cependant, lorsque l'algorithme SVM traite une grande complexité de calcul et des exigences de stockage.

En résumé, les méthodes actuelles d'identification des types de pylônes souffrent de besoins de stockage limités.

efficacité de la reconnaissance, sensibilité aux variations de la densité des points d'échantillonnage, élevée En résumé, les méthodes actuelles d'identification des types de pylônes souffrent de limites.

complexité informatique et longs temps de formation. De plus, il n'existe pas de méthode appropriée d'efficacité de reconnaissance, de sensibilité aux variations de la densité des points d'échantillonnage, de haute com-

pour calculer les paramètres des nuages de points du pylône. Pour résoudre la complexité putationnelle susmentionnée et les longs temps de formation. De plus, il n'existe pas de méthode adaptée

problèmes, cette étude propose une méthode améliorée pour identifier les types de pylônes basée sur le calcul des paramètres des nuages de points de pylônes. Pour résoudre ce qui précède

mesure de similarité et une nouvelle méthode de calcul des paramètres caractéristiques des problèmes de pylônes, cette étude propose une méthode améliorée pour identifier les types de pylônes basée sur

nuages de points. Erreur! Source de référence introuvable. La figure 1 montre la mesure de similarité du flux de traitement des données et une nouvelle méthode de calcul des paramètres caractéristiques du pylône!

graphique de cet article. Premièrement, les nuages de points sont prétraités avec des nuages de points de moyenne nulle. La figure 1 montre l'organigramme de traitement des données de cet article. Premièrement, le point

normalisation, décalage et redirection avant que les informations sur le pylône ne soient obtenues. les nuages sont prétraités avec une normalisation, un décalage et une redirection à moyenne nulle avant

Deuxièmement, les types de pylônes sont identifiés en calculant la mesure de similarité entre les courbes de forme générées sur la base des nuages de points et les types de pylônes. Déterminés en utilisant l'ensemble de données. Ensuite, les

courbes au sein de l'ensemble de données. Ensuite, les positions caractéristiques des pylônes sont déterminées en fonction les positions caractéristiques du pylône sont déterminées sur la base du nombre, de la densité, du taux de

remplissage et du paramètre de forme des nuages de points calculés. Dans le nombre, densité, taux de remplissage et paramètre de forme. Dans le cas de l' obtention de ces positions, les

points caractéristiques sont dérivés des nuages de points pour calculer la caractéristique, calculer les paramètres caractéristiques. Enfin, les modèles 3D des pylônes sont reconstitués sur paramètres. Enfin, les modèles 3D de pylônes sont reconstruits sur la base des valeurs calculées.

valeurs.

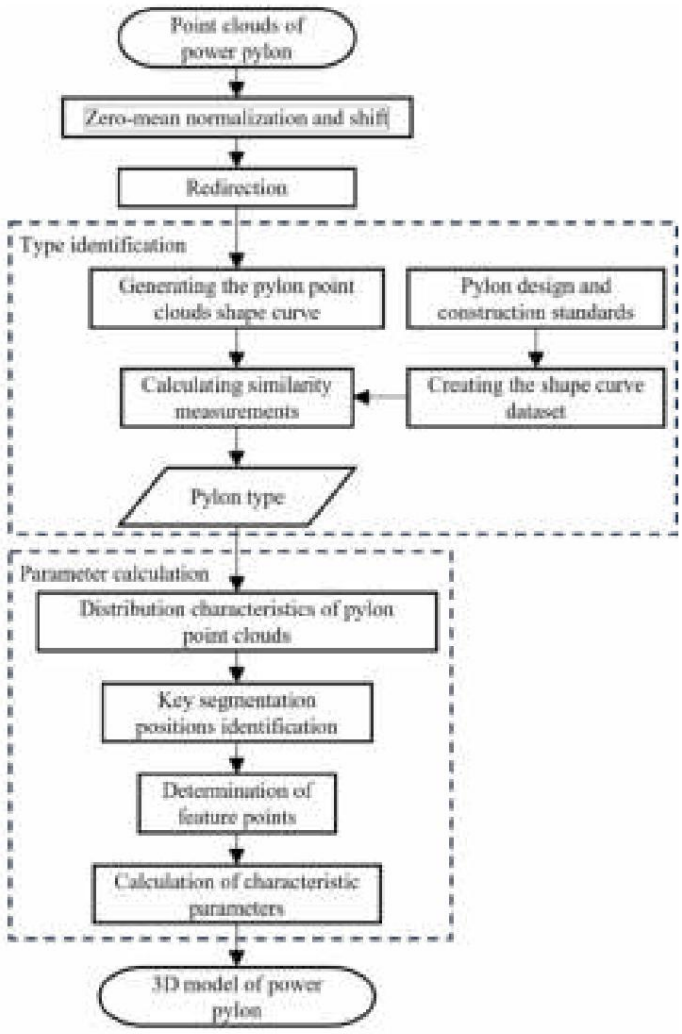


Figure 1. Organigramme global de l'identification du type et du calcul des paramètres.

Machine Translated by Google

Les principales innovations et contributions de cette étude sont les suivantes : 1.

Cette étude propose une méthode améliorée pour identifier les types de pylônes basée sur la mesure de similarité et un ensemble de données transformé linéairement. En comparant les effets de quatre mesures de similarité sur l'identification du type de pylône, une mesure de similarité plus adaptée à l'identification de divers types de pylônes est obtenue.

2. Une nouvelle méthode de calcul automatique des paramètres caractéristiques à l'aide de données LiDAR aéroportées est proposée pour la première fois. Il peut extraire efficacement les informations spécifiques du pylône, garantissant ainsi la grande précision des paramètres caractéristiques.

3. Les modèles 3D des quatre types de pylônes sont reconstruits sur la base des types de pylônes identifiés et des paramètres calculés, qui peuvent refléter avec précision la véritable structure des pylônes.

2. Identification du type de nuage de points de pylône basée sur des mesures de similarité

Dans le processus de collecte de nuages de points de pylônes à l'aide du LiDAR aéroporté, la majorité des points laser ne sont pas obtenus en balayant la surface de la cible verticalement mais plutôt par incidence inclinée. Par conséquent, en plus d'être situés au sommet du pylône, certains nuages de points du pylône sont situés sur les côtés du pylône. De plus, en l' absence d'itinéraires de vol de véhicules aériens sans pilote (UAV) et d'informations géographiques spatiales spécifiques sur les pylônes, il est impossible de déterminer de quel côté appartiennent les points.

Par ailleurs, la structure du pylône est généralement complexe. Si tous les nuages de points de pylônes sont utilisés pour déterminer le type de pylône dans l'espace 3D, les circonstances susmentionnées rendront difficile la réalisation de cet objectif.

Pour résoudre ce problème plus efficacement, cet article présente les courbes de forme des pylônes, simplifiant ainsi l'identification du type de pylône dans l'espace 3D à l'identification des courbes dans un espace bidimensionnel (2D). Cette courbe peut refléter avec précision la forme du pylône. Les formes des différents types de pylônes présentent des différences significatives, et les formes des pylônes appartenant au même type mais de modèles différents sont fondamentalement similaires. Enfin, les mesures de similarité sont combinées pour déterminer la ressemblance entre la courbe de forme dérivée des nuages de points du pylône et les courbes de l'ensemble de données, puis le type de pylône est déterminé.

2.1. Prétraitement des nuages de points

Considérant que les nuages de points de pylône collectés par LiDAR aéroporté peuvent être orientés arbitrairement dans l'espace 3D, afin de faciliter le calcul des mesures de similarité et le traitement ultérieur, nous effectuons une normalisation de moyenne nulle sur les données du nuage de points de pylône à l'aide de l'équation (1). Ensuite, on transforme les coordonnées des points traités par en les décalant le long de la direction positive de l'axe Z, obtenant les coordonnées mises à jour (x', y', z').

$$\begin{aligned} x' &= x - x0 \\ y' &= y - y0 \\ z' &= z - z0 - \min(z - z0) \end{aligned} \quad (1)$$

où x0, y0 et z0 représentent les coordonnées de la position centrale des nuages de points initiaux ; et x et z représentent les coordonnées x', y', z' des nuages de points après normalisation et décalage à moyenne nulle.

La structure du pylône est généralement symétrique et la capture des caractéristiques de forme du pylône depuis la vue de face est plus efficace. Par conséquent, il est nécessaire de faire pivoter les nuages de points du pylône d'un certain angle, θ, avant de générer la courbe de forme du pylône, en alignant sa direction horizontale perpendiculairement à l' axe X.

La direction horizontale du pylône est généralement plus pertinente pour sa structure supérieure . Dans cette étude, des nuages de points dont les coordonnées Z dépassent H sont choisis et projetés sur le plan XY. Ensuite, les valeurs propres et les vecteurs propres des nuages de points projetés résultants sont calculés à l'aide de l'algorithme d'analyse en composantes principales (AC

La valeur propre minimale obtenue correspond au vecteur propre (v1, v2) perpendiculaire à l'orientation horizontale du nuage de points. Et l'angle de rotation θ est calculé par

Machine Translated by Google

le plan XY. Par la suite, les valeurs propres et les vecteurs propres des nuages de points projetés résultants sont calculés à l'aide de l'algorithme d'analyse en composantes principales (ACP). La valeur propre minimale obtenue correspond au vecteur propre (v1, v2) perpendiculaire à l'orientation horizontale du nuage de points. Et l'angle de rotation θ est calculé par l'équation (2)

[20] Enfin, la transformation des coordonnées est effectuée à l'aide de l'équation (3) pour obtenir le coordonnées (x", y", z") des nuages de points pivotés. Erreur ! Source de référence. et non projections des trouvé. La figure 2 affiche les projections des pylônes redirigés.

$$\theta = \arccos\left(\frac{v1}{\sqrt{v1^2 + v2^2}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x'' &= x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta) \\ y'' &= x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta) \\ z'' &= z' \end{aligned} \quad (3)$$

où x", y" et z" représentent les coordonnées des nuages de points pivotés.

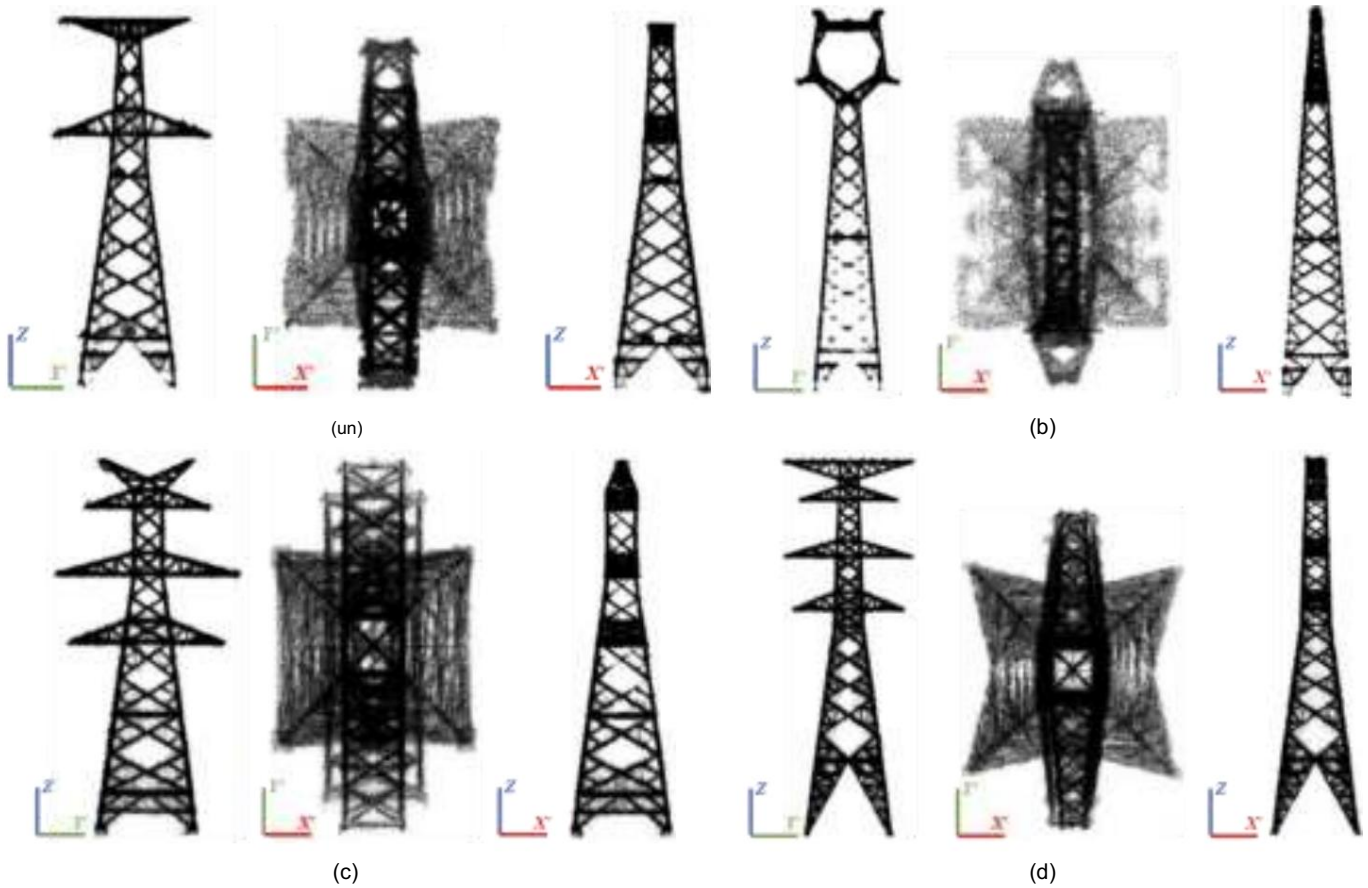


Figure 2. Les projections des pylônes redirigés sur les plans Y′Z, X′Y′ et X′Z. (a) Tapez un pylône.
(b) Pylône de type b. (c) Pylône de type C. (d) Pylône de type d.

Figure 2. Les projections des pylônes redirigés sur les Y′Z, X′Y′, et les avions X′Z . (a) Tapez un pylône.
(b) Pylône de type b. (c) Pylône de type C. (d) Pylône de type d.

2.2. Génération de la courbe de forme du nuage de points du pylône

2.2. Génération de la courbe de forme du nuage de points du pylône

Les nuages de points de pylônes redirigés sont projetés sur le plan Y′Z , puis verticalement.

superposé verticalement le long de l'axe Z à un certain intervalle de h1. Les points limites de chaque couche le long de l' axe Z à un certain intervalle de h1. Les points limites de chaque couche

Les courbes sont trouvées à l'aide d'une fenêtre coulissante. Ces points forment la forme globale du pylône et sont trouvés à l'aide d'une fenêtre coulissante. Ces points forment la courbe globale de la forme du pylône.

courbe. Compte tenu de la symétrie de la structure du pylône, la moitié des points limites peuvent être considérés. Compte tenu de la symétrie de la structure du pylône, la moitié des points limites peuvent être

être sélectionnés et connectés en séquence. Enfin, des courbes discrètes uniformément espacées, sélectionnées et connectées en séquence. Enfin, des courbes discrètes uniformément espacées, qui sont

sont les courbes de forme du nuage de points du pylône sont obtenues, comme le montre la figure 3. les courbes de forme du nuage de points du pylône sont obtenues, comme le montre la figure 3. Erreur ! Source de référence, introuvable.Figure 3.

Machine Translated by Google(un) ()

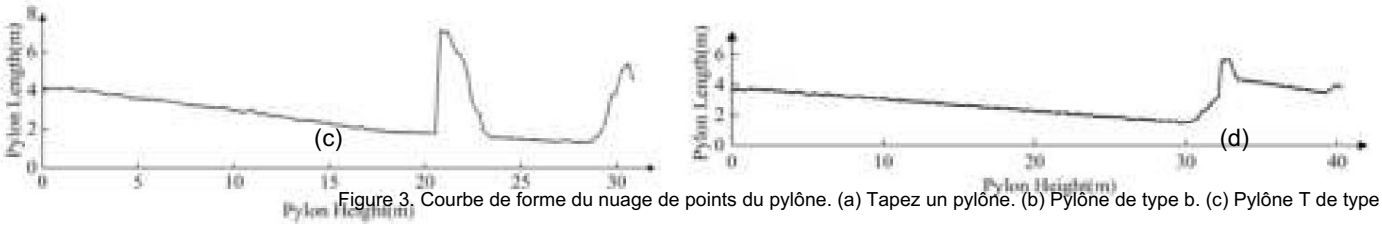
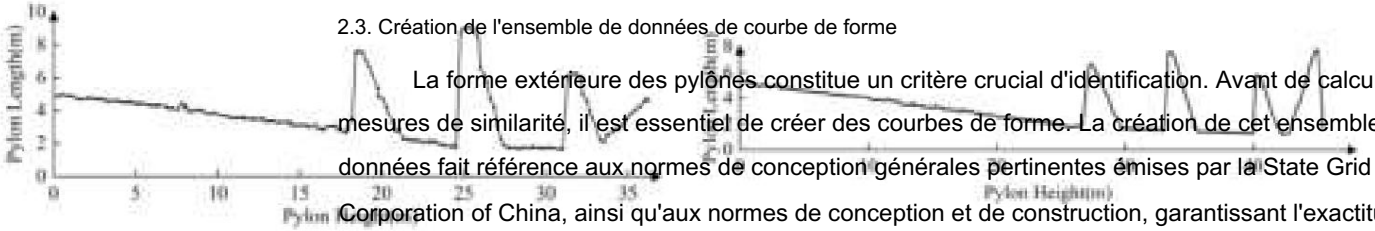


Figure 3. Courbe de forme du nuage de points du pylône. (a) Tapez un pylône. (b) Pylône de type b. (c) Pylône T de type d.

(un) (b)



(c) (d)

Figure 3. Courbe de forme du nuage de points du pylône. (a) Tapez un pylône. (b) Pylône de type C. (c) Pylône de type b. (d) Pylône de type d.

2.3. Création de l'ensemble de données de courbe de forme

La forme extérieure des pylônes constitue un critère crucial d'identification. Avant de calculer des mesures de similarité, il est essentiel de créer des courbes de forme. La création de cet ensemble de données fait référence aux normes de conception générales pertinentes émises par la State Grid Corporation of China, ainsi qu'aux normes de conception et de construction, garantissant l'exactitude et l'exhaustivité

Basé sur les paramètres de pylône courants fournis par ces normes, tels que la figure 3. Courbe de forme du nuage de points de pylône (a) Tapez un pylône. (b) Pylône de type b. (c) Pylône de type C. (d) longueur des bras transversaux et autres informations dans le pylône vertical et horizontal de type d.

des courbes de forme de différents pylônes dans l'ensemble de données sont générées. Ensuite, la section 2.3. Création l'ensemble de données est transformé linéairement à la même hauteur, comme le montre Er. La forme de l'ensemble de données de courbe de forme

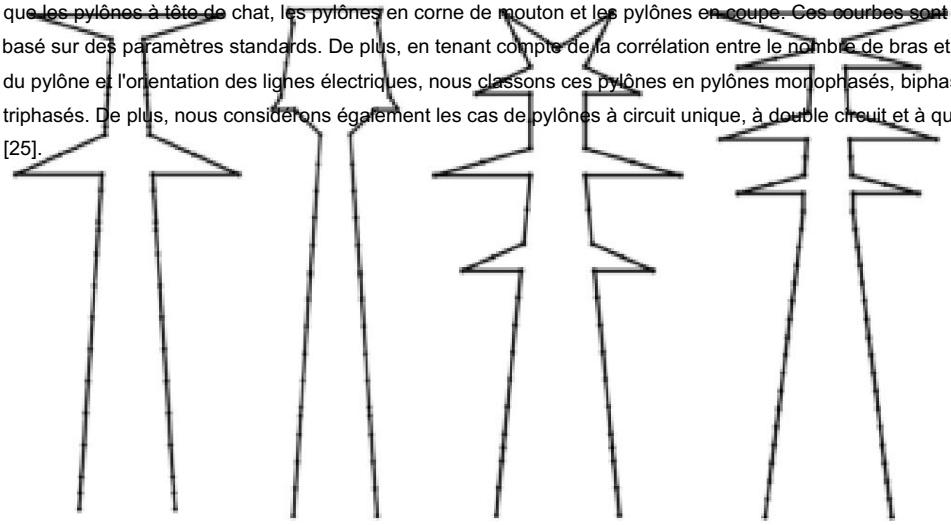
La forme extérieure des pylônes constitue un critère crucial pour identifier les types de pylônes. similarité, il est essentiel de créer un jeu de données de forme de pylône. Avant de calculer les mesures de

façonner des courbes. La création de cet ensemble de données fait référence à une conception générale pertinente et la moitié typique des points caractéristiques sont connectés pour former une courbe discrète avant l'utilisat par la State Grid Corporation of China, ainsi que d'autres normes de conception de pylônes

Actuellement, l'ensemble de données contient les courbes de forme de diverses normes communes de conception et de construction, garantissant l'exactitude et l'exhaustivité des données. Basé sur et les tels que les pylônes à tête de chat, les pylônes en corne de mouton et les pylônes en coupe. Ces courbes sont les paramètres communs des pylônes fournis par ces normes, tels que la hauteur, la longueur, la largeur, la

des courbes de forme de différents pylônes dans l'ensemble de données sont générées. Ensuite, la forme, le nombre de bras et de phases du pylône, ainsi que l'orientation de la puissance li sont transformés linéairement à la même hauteur, l'ensemble de données est transformé linéairement à la même hauteur, comme indiqué dans Error. Référez ces pylônes en pylônes monophasés, biphasés et triphasés. Source introuvable Figure 4. la moitié des points caractéristiques sont connectés pour former une courbe discrète avant utilisation. considérez les cas de courbe discrète de pylône à circuit unique, à double circuit et à quatre circuits avant utilisation.

Actuellement, l'ensemble de données contient les courbes de forme de divers pylônes électriques courants, tels que les pylônes à tête de chat, les pylônes en corne de mouton et les pylônes en coupe. Ces courbes sont générées basé sur des paramètres standards. De plus, en tenant compte de la corrélation entre le nombre de bras et de phases du pylône et l'orientation des lignes électriques, nous classons ces pylônes en pylônes monophasés, biphasés et triphasés. De plus, nous considérons également les cas de pylônes à circuit unique, à double circuit et à quatre circuits [25].



Formez les courbes de certains pylônes dans l'ensemble de données.

Figure 4. Figure 4. Courbes de forme de certains pylônes dans l'ensemble de données.

Figure 4. Courbes de forme de certains pylônes dans l'ensemble de données.

Machine Translated by Google

Actuellement, l'ensemble de données contient les courbes de forme de divers pylônes électriques courants, tels que les pylônes à tête de chat, les pylônes en corne de mouton et les pylônes en coupe. Ces courbes sont générées sur la base de paramètres standards. De plus, en tenant compte de la corrélation entre le nombre de bras et de phases du pylône et l'orientation des lignes électriques, nous classons ces pylônes en pylônes monophasés, biphasés et triphasés. De plus, nous considérons également les cas de pylônes à circuit unique, à double circuit et à quatre circuits [25].

2.4. Mesures de similarité

La courbe de forme d'un pylône peut fournir diverses informations, telles que la forme de la tête du pylône, la hauteur du pylône et le nombre de traverses. L'utilisation raisonnable des caractéristiques distinctives des différents types de pylônes contribuera à déterminer avec précision le type de pylône. De plus, la sélection des mesures de similarité est cruciale pour l'identification des types de pylônes. Cette étude sélectionne quatre mesures d'évaluation de similarité largement utilisées dans les domaines de la reconnaissance de formes et de l'intelligence artificielle : la distance Dynamic Time Warping (DTW), la distance FastDTW, la distance discrète de Fréchet et la distance de Hausdorff. Nous comparons leur efficacité dans l'identification des types de pylônes.

(1) Distance DTW et distance FastDTW : L'algorithme DTW est largement utilisé pour évaluer la ressemblance de séquences temporelles de différentes longueurs et a de nombreuses applications dans le domaine de la reconnaissance vocale [26,27]. Son approche principale est la suivante.

Supposons qu'il existe deux séquences temporelles, X = {x1, x2, . . . , xi , . . . , xn} et Y = {y1, y2, . . . , oui , . . . , euh}. La matrice de distance cumulée D de X et Y est construite en utilisant la distance euclidienne. Un chemin de déformation W dans la matrice D est trouvé tel que la somme des éléments le long du chemin soit minimisée. La distance cumulée minimale peut être calculée à l'aide de l'équation (4) en satisfaisant à la fois les contraintes de monotonie et de continuité.

$$D(i, j) = d(xi , yj) + \min\{D(i -1, j), D(i, j -1), D(i -1, j -1)\} \quad 1 \le i \le n , \ 1 \le j \le m \tag{4}$$

où d(xi , yj) représente la distance entre xi et yj . D(i, j) représente la distance cumulée entre les pas de temps xi et yj .

La distance minimale cumulée finale peut être utilisée pour évaluer la similarité des séquences X et Y. Une valeur plus petite indique que les deux séquences partagent une plus grande ressemblance en termes de forme ; à l'inverse, une valeur plus élevée suggère moins de similarité.

Cependant, lorsque les séquences temporelles sont longues, la complexité informatique du calcul de la distance DTW entre les deux séquences est de O (nm), ce qui conduit à une efficacité algorithmique relativement faible. Dans ce cas, l'algorithme DTW est généralement accéléré en limitant la plage de recherche de chemin, l'abstraction des données et l'indexation. FastDTW utilise les deux premières méthodes pour accélérer DTW. Cet algorithme amélioré réduit efficacement la complexité temporelle de DTW à O(m). FastDTW implique principalement trois processus : le grossissement, la projection et le raffinement [28-30].

(2) Distance discrète de Fréchet : La distance discrète de Fréchet prend en compte la forme des courbes ainsi que la séquence des points le long des courbes. Il s'agit d'une mesure de distance permettant de déterminer le degré de similarité entre les courbes et est utilisée dans divers domaines pour évaluer la similarité entre les courbes paramétrées [31,32]. Sa définition est la suivante.

S'il existe deux courbes polygonales X et Y constituées respectivement de m et n points. Pour calculer la distance discrète de Fréchet entre X et Y, on trouve d'abord la séquence correspondante de paires de points.

$$L = (xa1 , yb1),(xa2 , yb2), \cdots ,(xak , ybk) \tag{5}$$

Parmi eux, a1 = 1, b1 = 1, ak = m et bk = n. Et pour garantir l'ordre des points, pour tout i = 1, . . . , n, il y a ai+1 = ai ou ai+1 = ai + 1, bi+1 = bi , ou bi+1 = bi + 1. Ensuite, on calcule la distance maximale entre les paires de points correspondantes.

$$L = \underset{je=1,\cdots,k}{\text{maximum}} d(xai , ybi) \tag{6}$$

Machine Translated by Google

La distance discrète de Fréchet entre X et Y est définie comme suit :

$$Df(X,Y) = \min\{\quad L \quad\} \tag{7}$$

Df (X, Y) peut être utilisé pour évaluer la similarité entre X et Y. La ressemblance des formes entre les deux courbes augmente à mesure que la valeur diminue.

(3) Distance de Hausdorff : La distance de Hausdorff décrit la similarité de deux sous-ensembles en mesurant la distance qui les sépare dans l'espace [33]. S'il existe deux ensembles de points finis X et Y, de longueurs n et m respectivement, alors la distance de Hausdorff bidirectionnelle Dh (X, Y) de ces deux ensembles de données est :

$$\begin{aligned} Dh(X,Y) &= \max\{dh(X,Y), dh(Y,X)\}\, dh \\ (X,Y) &= \max_x \quad X\min_y \quad Y \quad x - y \\ dh(Y,X) &= \max_y \quad Y\min_x \quad X \quad y - x \end{aligned} \tag{8}$$

où Dh (X, Y) prend la valeur maximale entre dh (X, Y) et dh (Y, X). · représente la distance euclidienne entre les ensembles de points X et Y. dh (X, Y) est la distance la plus courte maximale entre le point de X et l' ensemble Y. dh (Y, X) représente la distance maximale la plus courte entre le point de Y et l' ensemble X.

La distance de Hausdorff mesure la dissemblance de deux ensembles de points et peut être utilisée pour évaluer la similitude de X et Y. Une valeur plus petite de Dh (X, Y) indique une plus grande similitude de forme entre X et Y.

3. Calcul des paramètres caractéristiques des nuages de points de pylône

Dans cette section, les caractéristiques de distribution des nuages de points de pylône, y compris le nombre, la densité et le taux de remplissage horizontal, sont d'abord calculées. Ensuite, ces caractéristiques et le type de pylône sont utilisés pour identifier les positions clés de segmentation. Enfin, sur la base de ces positions, les points caractéristiques sont dérivés des nuages de points pour calculer les paramètres caractéristiques.

3.1. Caractéristiques de distribution des nuages de points de

pylône Les nuages de points de pylône projetés sur le plan Y′Z sont superposés verticalement pour générer des histogrammes de la valeur caractéristique de distribution. Ensuite, une fenêtre glissante est utilisée pour identifier les couches qui satisfont simultanément à la fois le nombre maximum local de nuages de points et la densité maximale locale du nuage de points. Et le taux de remplissage horizontal de ces couches est calculé. Enfin, les positions clés de segmentation sont identifiées à partir des couches présentant le taux de remplissage le plus élevé.

Les nuages de points sont superposés le long de l' axe Z avec un intervalle fixe h1. Le nombre de points de pylône et la taille spatiale de chaque couche sont calculés et utilisés pour obtenir le degré de distribution des nuages de points dans chaque couche, c'est-à-dire la densité du nuage de points. Afin de bien prendre en compte le nombre de points de pylône et la densité du nuage de points, les deux paramètres sont standardisés. La somme De des deux paramètres obtenue après traitement est utilisée comme valeur caractéristique de distribution des nuages de points du pylône. Ensuite, une fenêtre de hauteur h2 glisse vers le haut depuis le bas du pylône à un intervalle fixe h1. Si la valeur De de la couche au milieu de la fenêtre est supérieure à la valeur De des autres couches de la fenêtre pendant le processus de glissement, la couche est considérée comme celle qui satisfait simultanément à la fois au nombre maximum local de nuages de points et à la densité maximale locale du nuage de points , comme le montre la figure 5 (lignes jaunes).

Dans l'analyse pratique, toutes les couches présentant les deux caractéristiques ci-dessus ne sont pas des couches clés requises pour les calculs ultérieurs. Les valeurs maximales N1 supérieures sont sélectionnées pour filtrer davantage les couches ici. Par la suite, les couches importantes peuvent être déterminées davantage en calculant le taux de remplissage de chaque couche. Le processus de calcul spécifique du taux de remplissage est le suivant : les couches importantes sont divisées en N2 grilles à un espacement fixe L1 le long de l' axe Y' , et la proportion de grilles contenant des points n par rapport au nombre total de N2 grilles est définie comme le taux de remplissage f, comme le montre la figure 6.

Machine Translated by Google

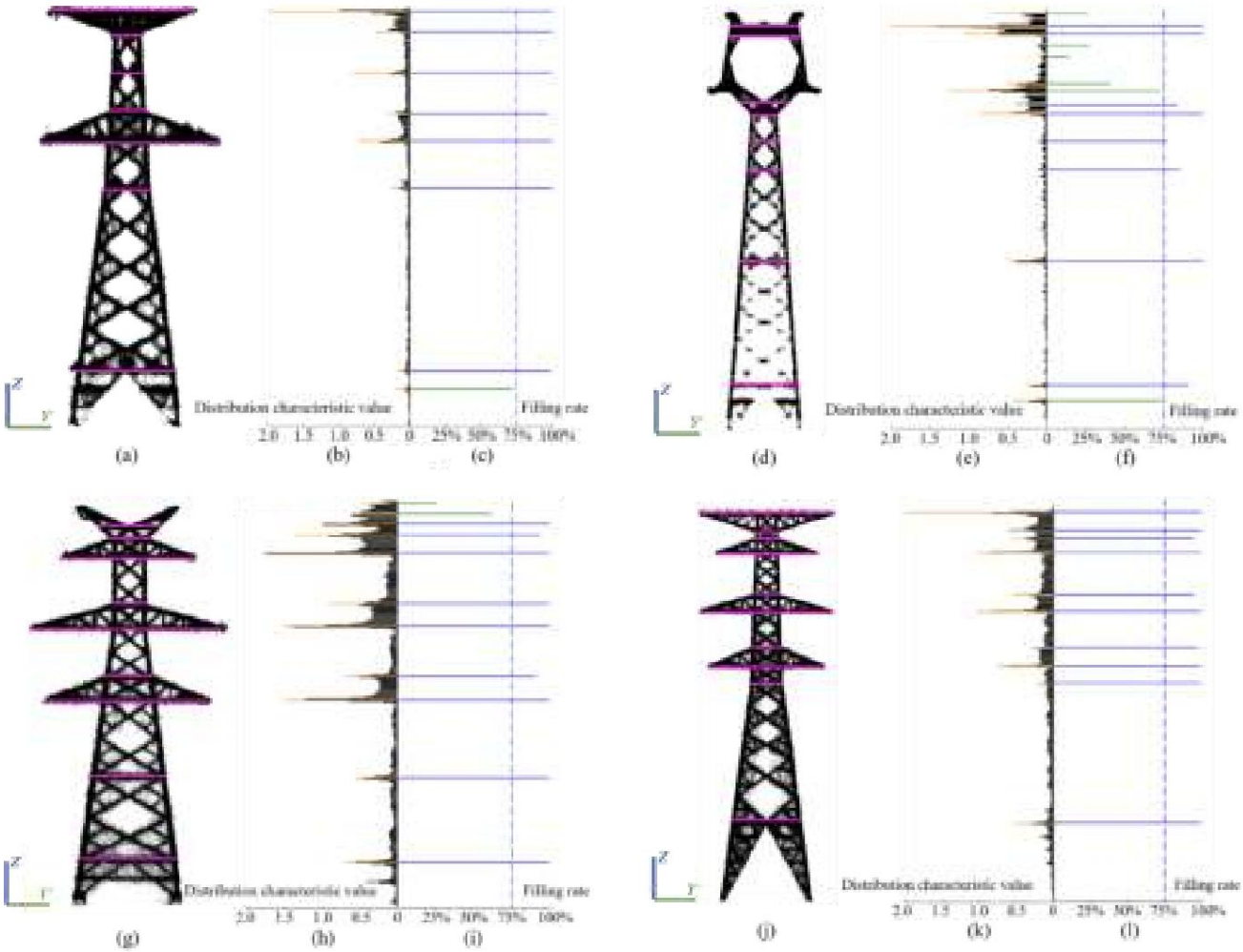


Figure 5. Caractéristiques de distribution des nuages de points de pylônes. (a,d,g,j) Les projections de t le plan Y′Z′. (b, e, h, k) Les histogrammes des valeurs caractéristiques de distribution et les lignes jaunes sont les couches avec la densité de nuages de points et la densité maximale locale. (c, f, i, l) Les histogrammes du taux de remplissage et les lignes bleues sont les positions clés de segmentation.

Figure 5. Caractéristiques de distribution des nuages de points de pylônes. (a,d,g,j) Les projections du pylône sur le plan Y′Z′. (b, e, h, k) Les histogrammes des valeurs caractéristiques de distribution et les lignes jaunes sont les couches avec la densité de nuages de points et la densité maximale locale. (c, f, i, l) Les histogrammes du taux de remplissage et les lignes bleues sont les positions clés de segmentation.

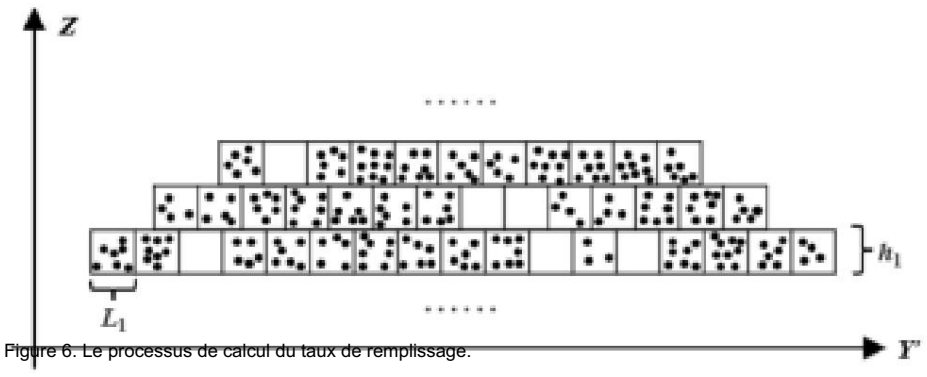


Figure 6. Le processus de calcul du taux de remplissage.

Figure 6. Le processus de calcul du taux de remplissage.

3.2. Identification du poste clé de segmentation

Le taux de remplissage f de la position clé de segmentation attendue (lignes jaunes) est calculé dans la section précédente. Lorsque le taux de remplissage d'une couche dépasse le seuil prédéfini Tf, la position clé de segmentation S peut être décrite comme la coordonnée Z moyenne de tous les éléments de la section précédente. Lorsque le taux de remplissage d'une couche dépasse le seuil prédéfini Tf, la position clé de segmentation S peut être décrite comme la coordonnée Z moyenne de tous les points de coordonnées Z au sein de la couche, comme le montre la figure 5Error! Source de référence pas de lignes). Pour les pylônes de type a et les pylônes de type d, toutes les positions clés de segmentation peuvent se trouver directement identifiés grâce à la méthode susmentionnée. Cependant, pour les deux autres types de Tf, la position clé de segmentation S peut être décrite comme la moyenne des points de coordonnées Z au sein de la couche, comme le montre la figure 5Error! Source de référence pas de lignes). Pour les pylônes de type a et les pylônes de type d, tous les points clés de segmentation sont directement identifiés à l'aide de la méthode susmentionnée. Cependant, po

Machine Translated by Google

pylônes, outre les positions obtenues comme décrit ci-dessus, des éléments supplémentaires sont nécessaires pour déterminer d'autres positions de segmentation clés.

Pour le pylône de type B, nous considérons d'abord le contour extérieur. Grâce à la section creuse dans la couche contenant les pylônes de type d de position d'isolateur de connexion, toutes les positions de segmentation clés peuvent être directement identifiées à l'aide du pylônes, le taux de remplissage de cette partie est relativement faible et donc non consi du procédé précité. Cependant, pour les deux autres types de pylônes, outre les positions position de segmentation. Considérant que la forme projetée de la structure obtenue comme décrit ci-dessus, des approches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer d'autres clés. sh.

Pour le pylône de type B, nous considérons d'abord le contour extérieur. En raison de la présence de la tête de pylône de ce type de pylône varie avec la hauteur dans le plan X'Y', les positions de segmentation Gi est introduit ici pour mieux identifier les positions clés de segmentation. Il s'agit d'une section creuse dans la couche contenant l'isolant de liaison position pour le type- rapport de la longueur maximale de projection des nuages de points sur les pylônes X' et b, le taux de remplissage de cette partie est relativemer faible et donc non considéré comme une clé Considérant que la forme projetée de la structure au-dessus du valeur minimum. La somme de G1 et de la constante d'erreur Ce sert de position de segmentation t. La tête de pylône de ce type de pylône varie avec la hauteur dans le paramètre de forme X'Y'. À partir de G1, chaque Gi est comparé séquentiellement au plan t, le paramètre Gi est introduit ici pour mieux identifier les positions clés de segmentation. Ce paramètre définit

TG. Si Gi dépasse TG, la couche de nuage de points correspondant à Gi-1 est le segment du rapport entre la longueur maximale de projection des nuages de points sur les axes X' et Y' et la longueur maximale de projection des nuages de points sur les axes X' et Y'.

La somme de G1 et de la constante d'erreur Ce sert de seuil TG pour Si -1 entre la tête du pylône et le corps du pylône, comme le montre la figure 7Error ! Concernant la valeur minimale. pas trouvé. (ligne rouge). Par observation, on peut constater que le tw TG. Si Gi dépasse TG, la couche de nuage le paramètre de forme. À partir de G1, chaque Gi est séquentiellement comparé au seuil de points correspondant à Gi-1 est la segmentation positions avec des taux de remplissage inférieurs au-dessus de la position de segmentation Si -1 entre la tête du pylône et le corps du pylône, comme le montre la figure 7 (ligne rouge). deux position de segmentation avec un remplissage inférieur positions de segmentation supportant les lignes de liaison. Addition Par observation, on constate que les les taux supérieurs à la position de segmentation sont les positions de segmentation clés soutenant le positions de segmentation en dessous de la position de segmentation avec des lignes de connexion de taux de remplissage. De plus, les deux positions de segmentation situées sous la zone de segmentation les exigences ne doivent pas être prises en compte, et ce traitement n'affectera pas les postes dont les taux de remplissage qui répondent aux exigences ne doivent pas être pris en compte, et ceci le traitement n'affectera pas le calcul ultérieur des paramètres. calcul des paramètres.

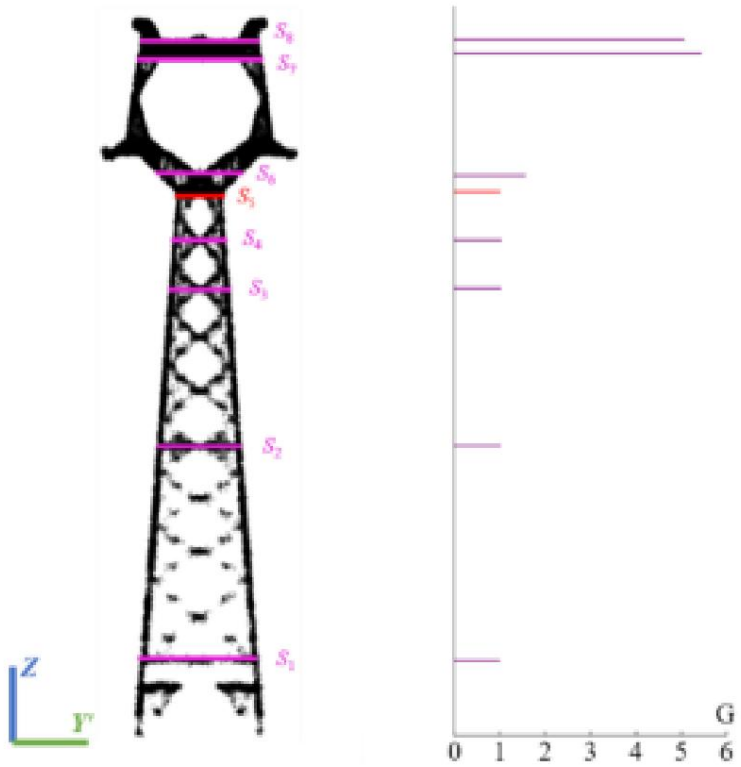


Figure 7. Paramètres de forme du pylône de type B.

Figure 7. Paramètres de forme du pylône de type B.

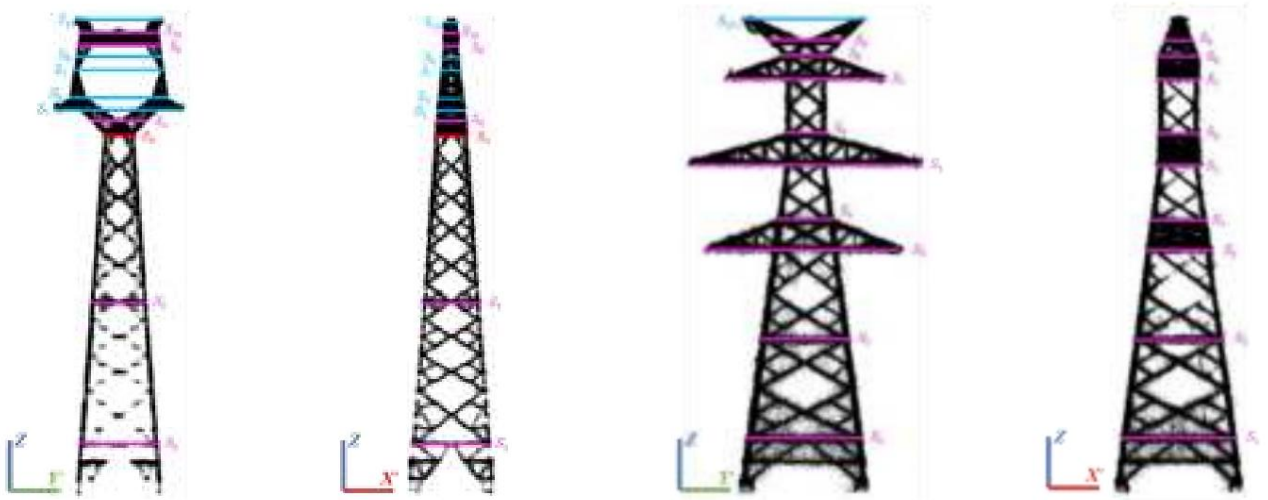
Avant de modéliser les pylônes de type B, il est indispensable d'obtenir les dimensions de leurs structures creuses internes. D'après la figure 6, il est évident que la position creuse se situe entre

Avant de modéliser les pylônes de type B, il est essentiel d'obtenir précisément la position clé de segmentation S5 du corps du pylône et la position clé de segmentation structures creuses internes. À partir de la figure 6Erreur ! Source de référence non trouvée.S7 de la tête du pylône. De plus, les taux de remplissage au niveau du segment clé sont relativement plus faibles l'intérieur de la structure creuse par rapport aux positions de segmentation clés. Les positions de mention à et la position clé de segmentation S7 de la tête du pylône. De plus, d'autres positions de segmentation dans En combinant la relation de position et les caractéristiques de distribution des nuages de points, la clé la structure creuse peuvent être identifiées. des taux de remplissage inférieurs aux positions de segmentation clés à l'intérieur de la structure creuse par rapport aux positions susmentionnées. En combinant la relation de position et les caractéristiques de distribution, les positions de segmentation clés dans le creux sont identifiées.

Pour le pylône de type B et le pylône de type C, on peut constater que

Machine Translated by Google

Pour le pylône de type b et le pylône de type c, on constate que la segmentation
La position au sommet du pylône n'a pas été identifiée en raison du faible taux de remplissage du
nuages de points en observant la figure 5, et cela doit être considéré séparément. Le plus haut
parmi les positions clés attendues de la segmentation qui ne respectent pas le seuil de taux de remplissage
L'exigence peut être choisie comme l'une des positions clés de segmentation. Enfin, toute la clé
et le pylône de type C peut être obtenu, comme le montre la figure 8Error! La source de référence et non les positions de
trouvé.
segmentation du pylône de type B et du pylône de type C peuvent être obtenues, comme indiqué
dans la figure 8.



(un) (b)

Figure 8. Les positions clés de segmentation du pylône. (a) Pylône de type B. (b) Pylône de type C.
Figure 8. Les positions clés de segmentation du pylône. (a) Pylône de type B. (b) Pylône de type C.

3.3. Détermination des points caractéristiques
3.3. Détermination des points caractéristiques

L'objectif principal de la détermination des points caractéristiques des pylônes est de mieux calculer
L'objectif principal de la détermination des points caractéristiques des pylônes est de mieux calculer divers paramètres
des pylônes inconnus, tels que la hauteur du pylône, la longueur des bras transversaux, l'espacement des pieds du pylône,
paramètres de pylônes inconnus, tels que la hauteur du pylône, la longueur des bras croisés, l'espacement des jambes du
pylône, etc. Cette étude choisit des points sur les limites des positions de segmentation clés du pylône comme
etc. Cette étude choisit des points sur les limites des positions de segmentation clés du pylône comme points caractéristiques.
points caractéristiques. Les quatre types de pylônes considérés dans cette étude ont le même corps de pylône
Les quatre types de pylônes considérés dans cette étude ont les mêmes structures de pylône et de pied
de pylône. Ces points caractéristiques suffisent pour calculer les paramètres requis
structures du corps et des jambes du pylône. Ces points caractéristiques suffisent pour calculer les besoins
pour ces deux structures. Cependant, chaque type de pylône a une structure de tête complexe,
paramètres pour ces deux structures. Cependant, chaque type de pylône a une structure de tête complexe, nécessitant l'identification de points caractéristiques supplémentaires pour calculer le
structure unique de la tête du pylône, nécessitant l'identification de points caractéristiques supplémentaires par rapport aux
paramètres pertinents de la tête du pylône.
calculer les paramètres pertinents de la tête du pylône.

En prenant le pylône de type B comme exemple pour introduire la stratégie de sélection de points caractéristiques,
En prenant le pylône de type B comme exemple pour introduire la sélection de points caractéristiques,
la position sélectionnée des points caractéristiques du pylône de type B est illustrée à la figure 9, dans
stratégie, la position sélectionnée des points caractéristiques du pylône de type b est indiquée sur la figure dont les points
orange représentent les points caractéristiques obtenus en conjonction avec la clé
9Erreur ! Source de référence introuvable., dans laquelle les points orange représentent les positions de segmentation des
fonctionnalités. Le point 25, comme indiqué sur la figure, représente le point de connexion
points obtenus en conjonction avec les positions clés de segmentation. Point 25, comme indiqué entre la
traverse et le corps du pylône. La coordonnée de l'axe Z peut être déterminée par
sur la figure, représente le point de connexion entre la traverse et le corps du pylône. identifiant sa position caractéristique.
La coordonnée de l'axe Z peut être déterminée en identifiant sa position caractéristique. Sur les points 11, 12 et 26 peuvent être
Combinés avec les points 27 et 30 en haut. Pour une ligne peut être ajustée pour calculer le 8, les nuages de points
Coordonnée de l'axe Y. De même, les informations de coordonnées sur l'intervalle du point 11, du point 12 et du
peut être obtenu de cette manière. Concernant le point 7 et le point 8, les nuages de points entre point se déplaçant du point 1
et du point 2 vers le milieu par une fenêtre glissante, les premiers points
1 et le point 2 sont superposés le long de l'axe Y avec un certain intervalle, et le point avec
les coordonnées de l'axe Z situé à la position de segmentation clé S10 est trouvé. Ces deux
La coordonnée maximale de l'axe Z dans chaque couche est sélectionnée. Ensuite, en passant du point 1 au point, les points
sont identifiés comme le point 7 et le point 8, comme l'indiquent les marqueurs rouges sur la figure 10.
2 vers le milieu par une fenêtre coulissante, les premiers points avec les coordonnées de l'axe Z sont localisés. Au total, 36
points caractéristiques doivent être déterminés pour le pylône de type a, tandis que le type b,
à la position clé de segmentation S10 . Ces deux points sont identifiés comme le point 7 et le point 8, comme l'indiquent les
Les pylônes de type c et de type d nécessitent respectivement 63, 51 et 52 points caractéristiques.
marqueurs rouges sur la figure 10Error! Source de référence introuvable..

Au total, 36 points caractéristiques doivent être déterminés pour le pylône de type a, tandis que le pylône de type

Les pylônes b, de type c et de type d nécessitent respectivement 63, 51 et 52 points caractéristiques.

Machine Translated by Google

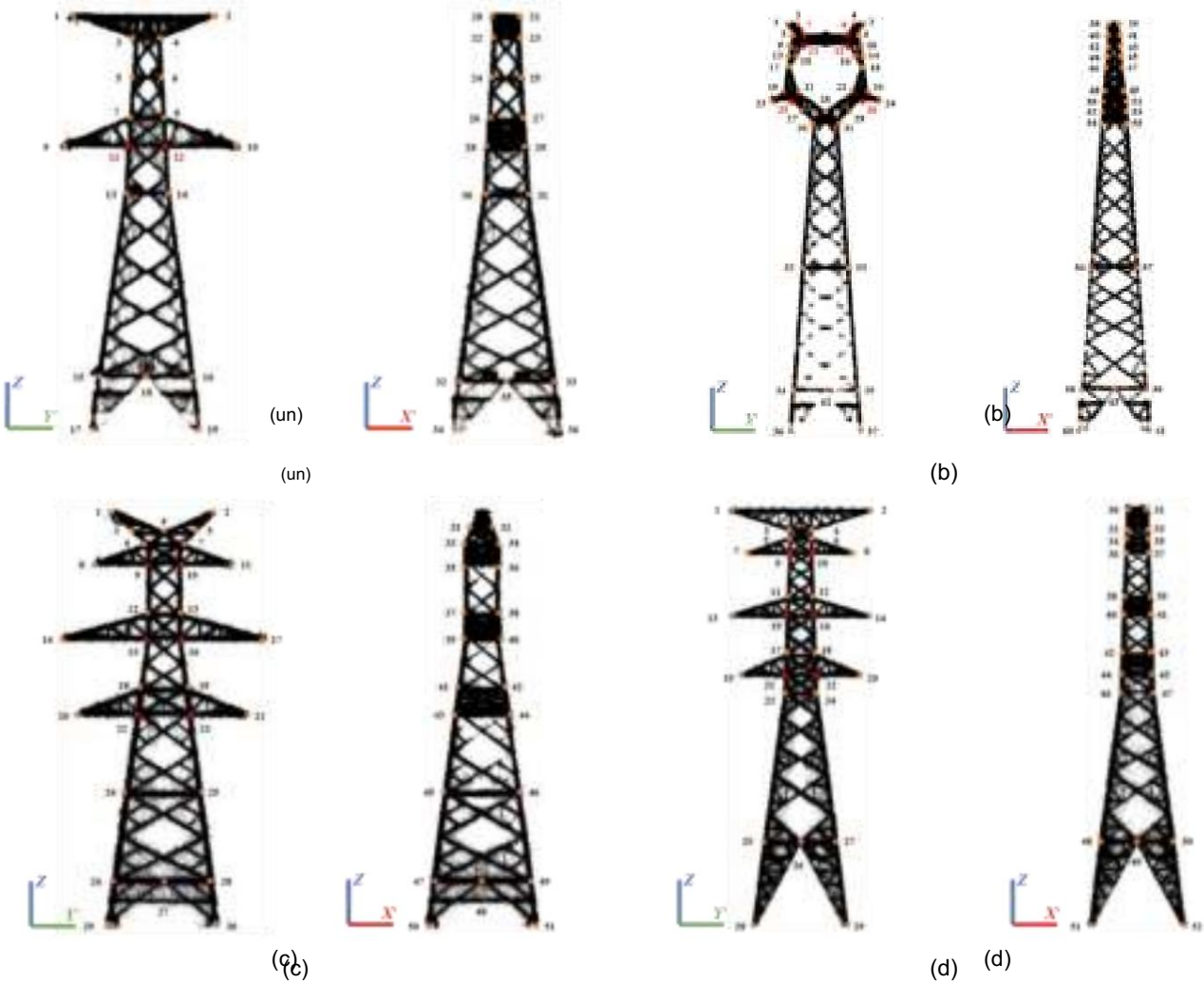


Figure 9. Points caractéristiques et numéros du pylône, et les points rouges sont les points caractéristiques obtenus par la figure 9. Points caractéristiques et numéros du pylône, et les points rouges sont les points caractéristiques obtenus par la
segmentation avec les points environnants. (a) Tapez un pylône. (b) Pylône de type b. (c) Pylône de type C. (d) Pylône de type d. segmentation avec les points environnants. (a) Tapez un pylône. (b) Pylône de type b. (c) Pylône de type C. (d) Pylône de type d.

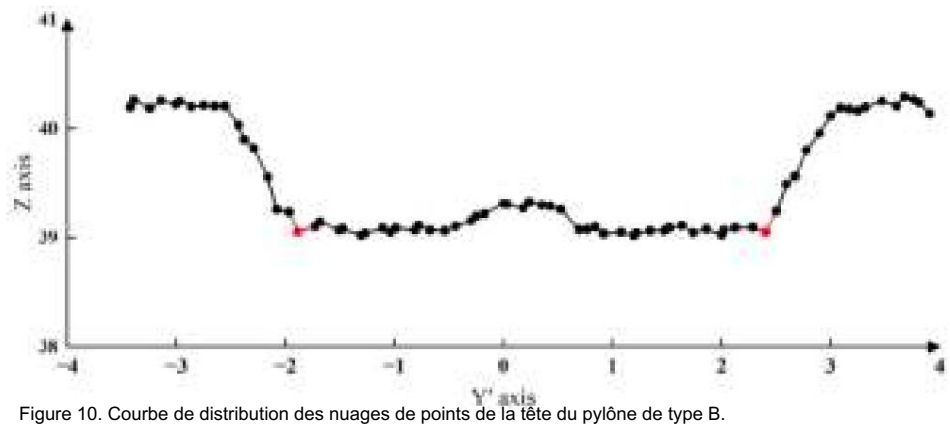


Figure 10. Courbe de distribution des nuages de points de la tête du pylône de type B.

Figure 10. Courbe de distribution des nuages de points de la tête du pylône de type B.

3.4. Calcul des paramètres caractéristiques

3.4. Calcul des paramètres caractéristiques

Sur la base des informations de coordonnées sur les points caractéristiques, paramètres caractéristiques 3.4. Calcul des paramètres caractéristiques

Sur la base des informations de coordonnées sur les points caractéristiques, les paramètres caractéristiques sont calculés du point de vue de la hauteur, de la longueur et de la largeur. Cette étude prend la base

Sur la base des informations de coordonnées sur les points caractéristiques, les paramètres caractéristiques sont calculés du point de vue de la hauteur, de la longueur et de la largeur. Cette étude prend la base

tapez un pylône comme exemple pour présenter les paramètres qui doivent être calculés. Les valeurs

tapez un pylône comme exemple pour présenter les paramètres qui doivent être calculés. Les valeurs

en termes de hauteur, la différence de coordonnées verticales entre le point 20 et le point 30 en

en termes de hauteur, la différence de coordonnées verticales entre le point 20 et le point 30 en

hauteur de la tête du pylône. La différence de coordonnées verticales entre le point 30 et en termes

hauteur de la tête du pylône. La différence de coordonnées verticales entre le point 30 et en termes

de hauteur, la différence de coordonnées verticales entre le point 20 et le point 3 représente la

de hauteur, la différence de coordonnées verticales entre le point 20 et le point 3 représente la

tête du pylône. La différence de coordonnées verticales entre le point 30 et

tête du pylône. La différence de coordonnées verticales entre le point 30 et

Machine Translated by Google

la hauteur de la tête du pylône. La différence de coordonnées verticales entre le point 30 et le point 32 représente la hauteur du corps du pylône, et la différence entre le point 32 et le point 34 représente la hauteur du pied du pylône. Concernant la longueur, la longueur de la traverse de la ligne de sol peut être obtenu en mesurant la différence de coordonnées horizontales entre le point 1 et le point 2, tandis que la longueur de la traverse est déterminée par la différence entre le point 9 et le point 10. De plus, la différence de coordonnées horizontales entre le point 17 et le point 19 représente l'espacement des pieds du pylône. Concernant la largeur, pour les points projetés sur le plan X′Z , le calcul de la différence de coordonnées horizontales des points à la même hauteur peut fournir les paramètres de largeur requis.

4. Expériences

Dans cette section, les données et paramètres utilisés dans l'expérience sont d'abord introduits dans Section 4.1, puis la précision de l'identification du type de tour et des paramètres de caractéristiques le calcul est respectivement indiqué dans les sections 4.2 et 4.3. Enfin, la 3D reconstruite des modèles de pylônes sont présentés à la section 4.4.

4.1. Données expérimentales et introduction des paramètres

Cette étude a obtenu des données de nuages de points à l'aide de la plateforme de vol DJI M300RTK avec le module LiDAR Livox L1 intégré. Les paramètres de base des données LiDAR sont affichés dans le tableau 1. Les données LiDAR collectées comprennent non seulement les coordonnées 3D des points mais aussi leurs informations de couleur RVB. Les données couvrent les corridors de transport d'électricité avec niveaux de tension de 110 kV et 220 kV dans les provinces du Hubei et du Sichuan. En ordre pour faciliter l'avancement de cette étude, les données ont été segmentées à l'aide du logiciel open source logiciel CloudCompare 2.13 pour obtenir les données du nuage de points du pylône.

Tableau 1. Paramètres de base des données LiDAR.

Densité de points	Précision horizontale	Précision verticale
>100 pts/m2	10 cm	5 cm

Les programmes d'identification du type de pylône et de calcul des paramètres ont été écrits en Python et exécuté sur un ordinateur portable. Les informations de configuration de l'ordinateur portable sont présentées dans le tableau 2. Les données de nuages de points de pylône obtenues par segmentation ont été traitées selon la méthode proposées dans ce document. Les paramètres impliqués dans le traitement sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 2. Informations de configuration de l'ordinateur portable.

Ordinateur portable	CPU	GPU	RAM
Lenovo Legion R9000P 2023 AMD Ryzen 9 7945HX NVIDIA RTX 4060			16 GB

Tableau 3. Paramètres des paramètres.

Paramètres	Signification	Valeurs
H	Hauteur minimale des nuages de points pour la redirection	(3/4) × la hauteur du pylône
h1	L'intervalle de couche le long de la direction de l'axe Z	0,1 m
h2	La hauteur de la fenêtre coulissante	1,1 m
L1	L'intervalle de grille le long de la direction de l'axe Y '	0,1 m
Tf	Le seuil de taux de remplissage	75%
Ce	Constante d'erreur	0,5
N1 (type-a)	Le nombre sélectionné de couches clés	8
N1 (type-b)		14
N1 (type-c)		11
N1 (type-d)		dix

Machine Translated by Google

4.2. Précision de l'identification du type de pylône

Quatre mesures d'évaluation de similarité différentes, à savoir la distance DTW, la distance FastDTW, la distance discrète de Fréchet et la distance Hausdorff, sont utilisées pour l'identification du type de pylône à l'aide de la méthode décrite dans la section précédente. Cette section utilise deux types d'ensembles de données de courbes de forme pour mener les expériences. L'un est l'ensemble de données obtenu directement sur la base des informations de dessin, et l'autre est l'ensemble de données obtenu en mettant à l'échelle linéaire l'ensemble de données ci-dessus à la même hauteur. Enfin, les résultats d'identification du type de pylône des quatre mesures d'évaluation de similarité ont été obtenus.

Pour évaluer de manière exhaustive les performances d'identification des différentes mesures de similarité, cette étude a utilisé la précision, le rappel et le score F comme trois indices pour analyser les résultats expérimentaux (25).

La précision fait référence à la proportion de pylônes qui devraient appartenir à un certain type et qui appartiennent réellement à ce type dans l'expérience.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (9)$$

Le rappel fait référence à la proportion de pylônes d'un certain type qui devraient finalement appartenir à ce type.

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (dix)$$

où TP est le nombre d'échantillons déterminés comme étant d'un certain type de pylône et appartenant effectivement à ce type ; FP est le nombre d'échantillons déterminés comme étant d'un certain type de pylône mais appartenant en réalité à d'autres types ; et FN est le nombre d'échantillons d'un certain type de pylône qui sont déterminés comme étant d'autres types.

Le F-score fait référence à la moyenne harmonique de précision et de rappel, et il a été utilisé comme indice d'évaluation global de la performance d'identification des pylônes dans cette étude.

$$F = \frac{2P \times R}{P + R} \times 100\% \quad (11)$$

Plus les valeurs de ces trois indices d'évaluation sont grandes, meilleures sont les performances d'identification de la mesure de similarité. Pour les quatre types de pylônes de cette étude, les résultats d'identification du type de pylône utilisant différentes méthodes d'évaluation de similarité sont présentés dans la figure 11.

En utilisant l'ensemble de données d'origine pour le calcul, en ce qui concerne la précision, la distance DTW et la distance FastDTW présentaient la plus haute précision pour le pylône de type a et le pylône de type b. Pour le pylône de type C, la précision de la distance discrète de Fréchet était de 89,7 %, ce qui était nettement supérieur aux trois autres mesures de similarité. Pour le pylône de type D, les quatre mesures de similarité étaient fondamentalement équivalentes. En termes de rappel, pour le pylône de type a et le pylône de type b, la distance de Hausdorff et la distance Discrète de Fréchet ont donné des résultats légèrement supérieurs. Pour le pylône de type C, le rappel des quatre mesures de similarité était d'environ 76 %. Pour le pylône de type d, les résultats des quatre mesures de similarité étaient relativement inférieurs à ceux des trois autres types.

Compte tenu de l'indice d'évaluation global des performances de l'algorithme, pour le pylône de type A, les quatre mesures de similarité ont donné des résultats similaires, la distance de Hausdorff étant légèrement inférieure. Pour le pylône de type B, les scores F des quatre mesures de similarité étaient inférieurs à 66 %, ce qui indique de mauvaises performances d'identification. Pour le pylône de type C, le score F de la distance discrète de Fréchet était de 83,8 %, ce qui était meilleur que les autres mesures de similarité. Pour le pylône de type D, la distance DTW et la distance FastDTW ont donné des scores F légèrement plus élevés.

Machine Translated by Google

Le score de la distance Hausdorff était supérieur à celui des trois autres mesures.

En résumé, lors de l'identification du type de nuages de points de pylônes, en utilisant l'ensemble de données ordinaire pour le calcul, la distance discrète de Fréchet a présenté le meilleur indice d'évaluation global, avec un score F moyen de 76,4 %. En utilisant l'ensemble de données transformé par mise à l'échelle linéaire pour le calcul, l'indice d'évaluation global de la distance de Hausdorff était le meilleur, avec un score F moyen de 86,4 %.

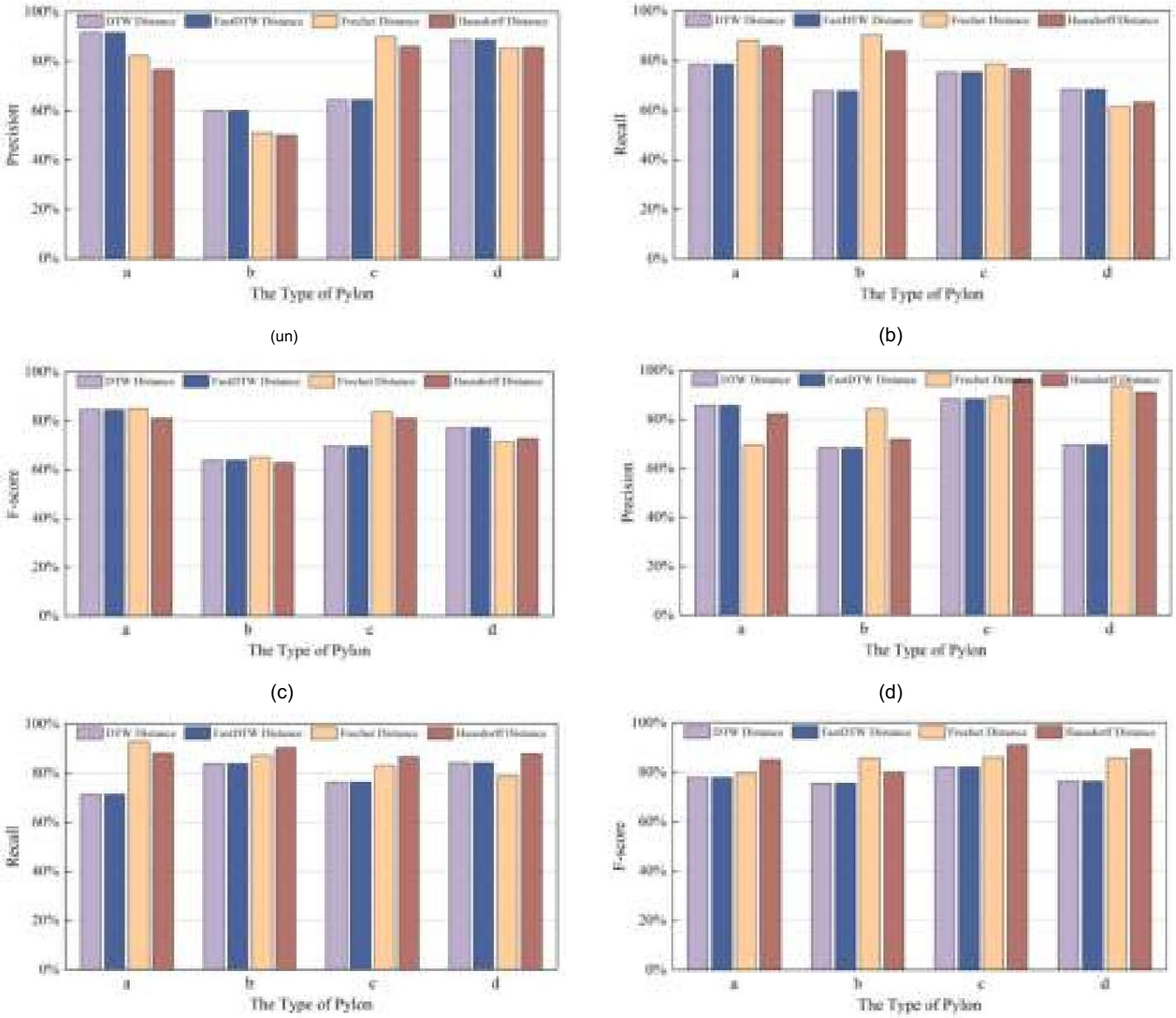


Figure 11. Résultats d'identification des types de pylônes à l'aide de différentes mesures de similarité. (a) La précision de quatre mesures de similarité (ensemble de données original). (b) Le rappel de quatre similarités de quatre mesures de similarité (ensemble de données original). (c) Le score F de quatre mesures de similarité (ensemble de données d'origine). (d) La précision de quatre mesures de similarité (ensemble de données transformé linéairement). (e) Le rappel de quatre mesures de similarité (ensemble de données transformé linéairement). (f) Le score F de quatre mesures de similarité (linéairement ensemble de données transformé).

Figure 11. Résultats d'identification des types de pylônes à l'aide de différentes mesures de similarité. (a) La précision de quatre mesures de similarité (ensemble de données original). (b) Le rappel de quatre mesures de similarité (ensemble de données original). (c) Le score F de quatre mesures de similarité (ensemble de données d'origine). (d) La précision de quatre mesures de similarité (ensemble de données transformé linéairement). (e) Le rappel de quatre mesures de similarité (ensemble de données transformé linéairement). (f) Le score F de quatre mesures de similarité (linéairement ensemble de données transformé).

En utilisant l'ensemble de données transformé par mise à l'échelle linéaire pour le calcul, les quatre similitudes les mesures ont montré une amélioration significative de la précision de l'identification du type b pylône. Pour le pylône type-c et le pylône type-d, la précision de la distance Hausdorff pourrait dépasser 90 %. Concernant le rappel, pour le pylône de type A, la distance discrète de Fréchet a donné des résultats plus élevés. Pour les trois autres types de pylônes, les résultats du rappel du Hausdorff la distance était respectivement de 90,3 %, 86,5 % et 87,7 %, significativement plus élevée que les autres mesures de similarité. Compte tenu de l'indice d'évaluation global des performances de l'algorithme , les scores F des quatre mesures de similarité ont connu une amélioration substantielle. pour le pylône de type B. Pour les trois autres types de pylônes, le F-score du Hausdorff la distance était plus élevée que les trois autres mesures.

Machine Translated by Google

En résumé, lors de l'identification du type de nuages de points de pylônes, en utilisant la méthode ordinaire ensemble de données pour le calcul, la distance discrète de Fréchet a présenté la meilleure évaluation globale indice, avec un score F moyen de 76,4 %. Utilisation de l'ensemble de données transformé par mise à l'échelle linéaire pour le calcul, l'indice global d'évaluation de la distance de Hausdorff était le meilleur, avec un score F moyen de 86,4 %.

4.3. Précision de calcul des paramètres caractéristiques du pylône

Cette section a validé l'exactitude du calcul des paramètres clés pour quatre types de pylônes à l'aide d'exemples pratiques. Le pylône de type A a été pris ici comme cas typique. Le les valeurs calculées de ce pylône sont répertoriées dans le tableau 4 et ont été comparées au manuel valeurs de mesure. Finalement, l'erreur relative a été obtenue.

Tableau 4. Résultats du calcul des paramètres du pylône de type A.

En série Nombre	Points clés Connexion	Description du poste	Calculé Valeur/m	Mesure manuelle Valeur/m	Relatif Erreur
1	1–2 différence d' abscisse		10.2897	10.5	−2,00%
2			1,6932	1.8	−5,93%
3			2,0760	2,1	−1,14%
4			2,4361	2,4	1,50%
5			12,5012	13	−3,84%
6	croisés 11–12 différence	Longueur des bras d'abscisse / 13–14 différence	2,6784	2,7	−0,80%
7	d'abscisse / 15–16 différence	d'abscisse / 17–19	3,1005	3,2	−3,11%
8	différence d'abscisse		6,8951	7	−1,50%
9		Espacement des pieds	8,0340		0,43%
10	du pylône 20–21 différence d'abscisse / 26–27 différence d'abscisse /		1,5211	8	−4,93%
11	22–23 différence d'abscisse / 26–27 différence		1,6932	1,6	−5,93%
12	d'abscisse /		2,1018	1,8 2,1	0,09%
13			2,4824	2.4	3,43%
14	28–29 différence d'abscisse	Largeur des bras croisés	2,7438	2.8	−2,01%
15	30–31 différence d'abscisse		3.1937	3.2	−0,20%
16	32–33 différence d'abscisse	/ /	6.9042	7	−1,37%
17	34–36 différence d'abscisse	Espacement des pieds du pylône	8.0179	8	0,22%
18	32–34 différence d'ordonnée	Hauteur des pieds du pylône	4.0512	4	1,28%
19	30–32 différence d'ordonnée	Hauteur du corps du	13.4974	13.5	−0,02%
20	28–30 différence d'ordonnée		3.4989	3.5	−0,03%
21	26–28 différence d'ordonnée		2.0084	2	0,42%
22	24–26 différence d'ordonnée		2,9849	3	−0,50%
23	22–24 différence d'ordonnée		3.0140	3	0,47%
24	20–22 différence d'ordonnée	pylône / / / / /	1,5022	1,5	0,15%

Finalement, il a été constaté que l'erreur relative globale ne dépassait pas 5 % en calculant 80 échantillons de pylônes et en comparant leurs erreurs relatives maximales, validant ainsi le faisabilité de l'algorithme. Les résultats calculés pour les pylônes sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Erreur de calcul.

Type de pylône	Quantité	Erreur relative maximale	Erreur moyenne
un	20	3,28%	2,36%
b	20	4,96%	2,71%
c	20	4,62%	3,05%
d	20	4,37%	2,93%

Machine Translated by Google

4.4. Reconstruction du pylône

Sur la base des paramètres caractéristiques calculés dans la section précédente, des modèles 3D des quatre types de pylônes ont été reconstruits. Les modèles finaux sont présentés à la figure 12.

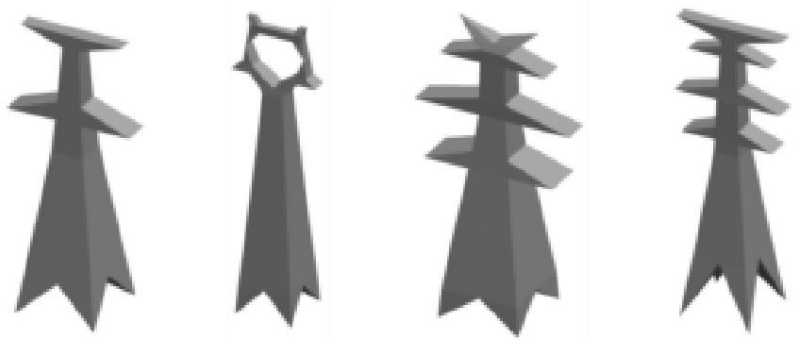


Figure 12. Modèles 3D de pylônes.

Figure 12. Modèles 3D de pylônes.

5. Discussion

5. Discussion

Cette section traite principalement des erreurs rencontrées dans l'identification du type de pylône, impact des points de bruit des données LiDAR sur le calcul des paramètres caractéristiques, et l'influence de la rareté des données.

Cette section traite principalement des erreurs rencontrées dans l'impact pyl des points de bruit des données LiDAR sur le calcul du char 5.1. Erreurs dans l'identification du type de pylône l'influence de la rareté des données.

5.1. Erreurs dans l'identification du type de pylône

Lors de l'utilisation de l'ensemble de données ordinaire, la distance DTW et la distance FastDTW ont tendance à pour classer à tort le pylône de type b et le pylône de type d comme pylône de type c. Cela peut être attribué au fait que DTW est une méthode de correspondance locale insensible à la forme globale changements, tandis que les formes des pylônes impliquent des changements globaux, entraînant une identification erronée des certains types de pylônes. La distance discrète de Fréchet et la distance de Hausdorff présentent davantage en hauteur entre le pylône de type d et les autres types de pylônes de l'ensemble de données. Après avoir utilisé le transformé linéairement, les erreurs d'identification du type de pylône sont réduites. Actuellement, applicable à l'identification des recherches existantes. Avenir la recherche peut se concentrer sur la conception d'algorithmes d'identification plus adaptés, basés sur la de cette étude pour améliorer sa généralité.

Lors de l'utilisation de l'ensemble de données ordinaire, la distance DTW et la distance FastDTW dans l'identification des nuages de points de pylône de type d, qui peuvent en hauteur certains types de pylônes. La distance discrète de Fréchet et les erreurs Hausdo dans entre le pylône de type d et d'autres types de pylônes dans l'ensemble de données transformé linéairement, les erreurs dans l'identifiant du type de pylône Actuellement, cette méthode est uniquement applicable à l'identification des recherches existantes. Les recherches futures peuvent se concentrer sur la conception d'une identification plus appropriée des résultats de cette étude afin d'améliorer sa généralité.

5.2. L'influence des points de bruit sur le calcul des paramètres caractéristiques

Les points de bruit sont principalement répartis dans deux zones du pylône. L'un des domaines se trouve à la jonction du corps du pylône et de la traverse, comme l'indique le cercle bleu en Figure 13. Ces points de bruit provoquent le déplacement des points caractéristiques sélectionnés sur le corps du pylône. vers l'extérieur, ce qui entraîne des erreurs excessives dans le calcul des paramètres caractéristiques. Dans cette étude, les véritables points caractéristiques peuvent être distingués par les caractéristiques de densité des points après les positions de segmentation clés se superposent, éliminant ainsi l'interférence d'un tel bruit points sur la sélection des points caractéristiques. Une autre partie des points de bruit est principalement constituée de points de chaîne d'isolant et points de ligne, comme indiqué par le cercle rouge sur la figure 13. Ce type du point de bruit a le plus grand impact sur le calcul des paramètres caractéristiques. Si de tels points existent, il sera difficile de calculer avec précision les paramètres du pylône à l'aide du méthode proposée dans cet article. Il est donc nécessaire de supprimer manuellement ce bruit

5.2. L'influence des points de bruit sur le calcul des points de caractéristiques avant d'identifier le type de pylône.

Les points de bruit sont principalement répartis dans deux zones de la jonction du corps du pylône et de la traverse, comme l'indique la figure 13Error! Source de référence introuvable. Ces points de bruit sur le corps du pylône se déplacent vers l'extérieur, ce qui entraîne un calcul excessif des paramètres. Dans cette étude, les véritables points caractéristiques ca caractéristiques de densité des points après la segmentation clé p éliminant l'interférence de ces points de bruit sur les points caractéristiques des points de bruit rimaril est constitué de points de contrainte isolants

Machine Translated by Google

a le plus grand impact sur le calcul des caractéristiques para, il sera difficile de calculer avec précision les paramètres du pylône dans cet article. Par conséquent, il est nécessaire de supprimer manuellement l'identification du type de pylône.

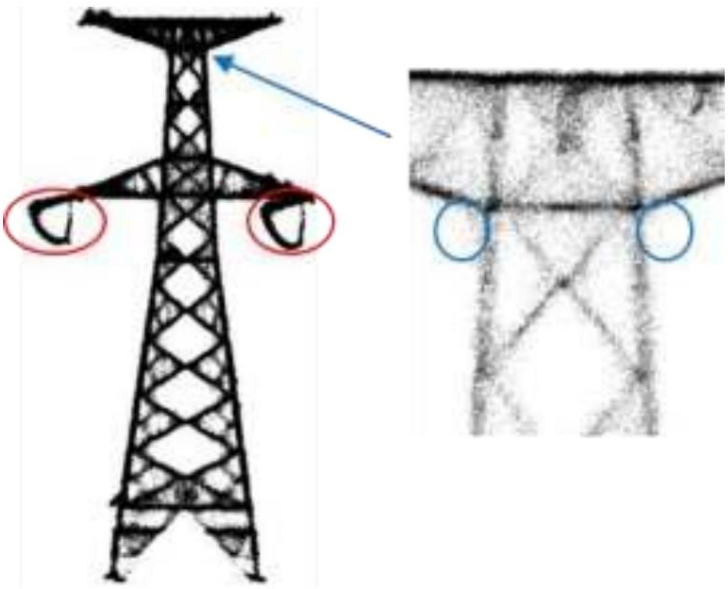


Figure 13. Nuages de points de pylône avec points d'interférence.

5.3. L'influence de la rareté des données

Au cours du processus d'inspection de puissance, le changement de hauteur de vol et de vitesse du drone entraînera une différence de densité de points. Lorsque l'altitude de vol est plus élevée et que le vol la vitesse est plus rapide, la densité de points obtenue est plus faible. Analyser l'influence de la rareté des données sur l'identification du type de pylône et le calcul des paramètres caractéristiques, le pylône d'origine les données de nuages de points sont échantillonnées par la méthode d'échantillonnage voxel. Le nombre de points de pylône obtenues à différentes distances d'échantillonnage sont présentées dans le tableau 6. Lorsque la distance d'échantillonnage est inférieure à 0,4 m, les méthodes décrites dans cet article peuvent être utilisées pour évaluer correctement le type de le pylône et les paramètres calculés du pylône sont relativement précis. Cependant, lorsque le la distance d'échantillonnage est supérieure à 0,4 m, les nuages de points deviennent clairsemés et la distribution les paramètres des nuages de points ne peuvent pas refléter les caractéristiques de la segmentation clé positions des pylônes. Le traitement de redirection est également affecté lorsque l'échantillonnage la distance dépasse 0,6 m. Les paramètres du tableau 3 ne peuvent pas rendre la direction horizontale de le pylône perpendiculaire à l' axe X. Dans ce cas, les paramètres doivent être réinitialisés pour résoudre ce problème.

Tableau 6. Nombre de points de pylônes échantillonnés avec différentes distances.

Type de pylône	Le nombre de points				
	Original Nuage de points	Exemple de distance			
		0,1 m	0,2 m	0,3 m	0,4 m
un	203 792	67 631	20 809	9528	5492
b	102 429	47 194	16 360	7786	4706
c	239 345	128 429	42 751	19 832	11 063
d	196 601	112 847	42 108	19 851	11 166

6. Conclusions

Cette étude propose une méthode améliorée pour identifier les types de pylônes électriques et un nouvelle méthode de calcul automatique de paramètres caractéristiques, visant à résoudre le problèmes de calcul complexe et de faible efficacité des méthodes existantes. Ils peuvent fournir le support de données nécessaire à la reconstruction de modèles 3D de pylônes. La méthode proposée dans cet article présente plusieurs caractéristiques et démontre un grand potentiel dans l'utilisation

Machine Translated by Google

données LiDAR aéroportées pour acquérir des informations de base sur les pylônes. Les résultats de recherche de cet article peuvent être résumés comme suit.

(1) Cet article présente une méthode pour générer des courbes de forme de pylône basées sur des données de nuages de points. Sur cette base, une méthode améliorée d'identification du type de nuage de points basée sur des mesures de similarité et un ensemble de données transformées linéairement est proposée. Cette méthode simplifie le problème d'identification du type de pylône dans l'espace 3D à l'identification des courbes dans l'espace 2D. Il peut identifier efficacement une variété de types de pylônes et fournir un support d'informations pour le calcul des paramètres des nuages de points de pylônes.

(2) Cette étude a comparé les effets d'identification de quatre mesures de similarité : la distance DTW, la distance FastDTW, la distance discrète de Fréchet et la distance de Hausdorff. En termes d'indice d'évaluation global (F-score), lors de l'utilisation de l'ensemble de données ordinaire, la distance discrète de Fréchet comme mesure de similarité a donné l'indice d'évaluation global optimal de 76,4 %. Pendant ce temps, la distance de Hausdorff en tant que mesure de similarité a obtenu les meilleures performances en utilisant l'ensemble de données après transformation linéaire, avec un score F moyen de 86,4 %.

(3) Une nouvelle méthode de calcul des paramètres de pylône basée sur les caractéristiques de distribution des nuages de points est proposée. Cette méthode peut extraire efficacement des informations spécifiques au nuage de points et garantir la précision du calcul des paramètres. Grâce au calcul et à l'analyse de 80 groupes de pylônes, il a été constaté que l'erreur relative maximale produite par cet algorithme ne dépassait pas 5%, vérifiant ainsi la faisabilité de l'algorithme.

Bien que la méthode proposée dans cette étude puisse donner des résultats relativement précis dans l'identification du type de pylône et le calcul des paramètres caractéristiques, certains aspects doivent encore être optimisés dans les recherches futures, comme suit. (1) Les types de pylônes considérés dans cet article sont limités par l'ensemble de données. Il est donc nécessaire d'élargir l'ensemble des données dans les études futures. (2) La méthode de sélection des points caractéristiques doit être optimisée en permanence pour réduire les erreurs de calcul dans les paramètres caractéristiques. (3) Dans les recherches futures, les pylônes à structure asymétrique seront également pris en c

Contributions des auteurs : Conceptualisation, SZ et LW ; méthodologie, SZ; validation, SZ; ressources, LW et BS ; conservation des données, SZ, SW et GW ; rédaction – préparation du projet original, SZ ; rédaction – révision et édition, SZ ; visualisation, SZ Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les données présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès de l' auteur correspondant. Les données ne sont pas accessibles au public en raison de restrictions de confidentialité.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Lu, Z. ; Gong, H. ; Jin, Q. ; Hu, Q. ; Wang, S. Une approche d'évaluation de l'état d'inclinaison de la tour de transmission basée sur un nuage de points dense à partir du LiDAR basé sur un drone. Remote Sens.2022 , 14, 408. [CrossRef]
2. Li, W. ; Luo, Z. ; Xiao, Z. ; Chen, Y. ; Wang, C. ; Li, J. Une méthode basée sur GCN pour extraire des lignes électriques et des pylônes à partir de données LiDAR aéroportées. IEEETrans. Géosci. Télésens.2022 , 60, 1–14. [Référence croisée]
3. Chen, C. ; Jin, A. ; Yang, B. ; Mar.; Soleil, S. ; Wang, Z. ; Zong, Z. ; Zhang, F. DCPLD-Net : un réseau neuronal à convolution couplé à la diffusion pour la détection des lignes de transport d'énergie en temps réel à partir de données LiDAR embarquées sur des drones. Int. J.Appl. Obs. de la Terre. Géoinfo. 2022, 112, 102960. [Réf. croisée]
4. Yang, J. ; Kang, Z. Extraction basée sur le voxel des lignes de transmission à partir de données de nuages de points LiDAR aéroportées. IEEE J. Sel. Haut. Appl. Obs. de la Terre. Remote Sens.2018 , 11, 3892-3904. [Référence croisée]
5. Xie, X. ; Liu, Z. ; Xu, C. ; Zhang, Y. Une méthode de plate-forme à capteurs multiples pour l'inspection des lignes électriques basée sur un grand hélicoptère sans pilote. Capteurs 2017, 17, 1222. [CrossRef] [Pub Med]
6. Jiang, S. ; Jiang, W. ; Huang, W. ; Yang, L. Photogrammétrie oblique basée sur un drone pour l'acquisition de données en extérieur et l'inspection visuelle hors site de la ligne de transmission. Remote Sens.2017 , 9, 278. [CrossRef]
7. Yang, L. ; Fan, J. ; Liu, Y. ; Mensonge.; Peng, J. ; Liang, Z. Une revue des techniques d'inspection de pointe des lignes électriques. IEEETrans. Instrument. Mesures. 2020, 69, 9350-9365. [Référence croisée]
8. Zhou, R. ; Jiang, W. ; Jiang, S. Une nouvelle méthode pour la reconstruction de conducteurs de faisceaux haute tension à partir de données LiDAR aéroportées. Remote Sens.2018 , 10, 2051. [CrossRef]

Machine Translated by Google

9. Zhao, P. ; Yang, W. ; Feng, Y. ; Li, F. ; Huang, X. Construction d'une scène 3D du couloir de la ligne de transport basée sur GIM et SIG 3D. J. Phys. Conf. Ser. 2021, 2005, 012083. [Réf. croisée]
10. Li, Q. ; Chen, Z. ; Hu, Q. Une approche basée sur un modèle pour la modélisation 3D de pylônes à partir de données LiDAR aéroportées. Télédétection. 2015, 7, 11501-11524. [Référence croisée]
11. Tang, Q. ; Zhang, L. ; Lan, G. ; Shi, X. ; Duanmu, X. ; Chen, K. Une méthode de classification des nuages de points du couloir de lignes de transport basée sur une forêt aléatoire améliorée et des fonctionnalités multi-échelles. Capteurs 2023, 23, 1320. [CrossRef] [Pub Med]
12. Zhu, S. ; Li, Q. ; Zhao, J. ; Zhang, C. ; Zhao, G. ; P'tit.; Chen, Z. ; Chen, Y. Une méthode basée sur l'apprentissage en profondeur pour extraire un nombre arbitraire de lignes électriques individuelles à partir de nuages de points de balayage laser montés sur un drone. Remote Sens.2024 , 16, 393. [CrossRef]
13. Guo, B. ; Huang, X. ; Li, Q. ; Zhang, F. ; Zhu, J. ; Wang, C. Une méthode de géométrie stochastique pour la reconstruction de pylônes depuis Airborne Données LiDAR. Remote Sens.2016 , 8, 243. [CrossRef]
14. Yang, L. ; Kong, S. ; Deng, J. ; Li, H. ; Liu, Y. DRA-Net : un réseau d'attention résiduelle à double branche pour Pixelwise Power Line Détection. IEEETrans. Instrument. Mesures. 2023, 72, 5010813. [Réf. croisée]
15. Wang, G. ; Wang, L. ; Wu, S. ; Zu, S. ; Song, B. Segmentation sémantique des nuages de points 3D du couloir de transmission basée sur CA-PointNet++. Électronique 2023, 12, 2829. [CrossRef]
16. Shen, Y. ; Yang, Y. ; Jiang, J. ; Wang, J. ; Huang, J. ; Ferreira, V. ; Chen, Y. Une nouvelle méthode pour segmenter un fil individuel à partir d'un faisceau Conducteur utilisant les données de nuage de points UAV-LiDAR. Mesure 2023, 211, 112603. [CrossRef]
17. Han, W. Modélisation tridimensionnelle de tour de puissance avec des données LiDAR aéroportées. J. Fleuve Yangtze Sci. Rés. Inst. 2012, 29, 122-126. [Référence croisée]
18. Zhou, R. ; Jiang, W. ; Huang, W. ; Xu, B. ; Jiang, S. Une méthode heuristique pour la reconstruction de pylônes électriques à partir de données LiDAR aéroportées. Remote Sens.2017 , 9, 1172. [CrossRef]
19. Camuffo, E. ; Mari, D. ; Milani, S. Progrès récents dans les algorithmes d'apprentissage pour les nuages de points : un aperçu mis à jour. Capteurs 2022, 22, 1357. [CrossRef]
20. Qiao, Y. ; Xi, X. ; Nie, S. ; Wang, P. ; Guo, H. ; Wang, C. Reconstruction du pylône électrique à partir de données LiDAR aéroportées basées sur le composant Segmentation et correspondance de modèles. Remote Sens.2022 , 14, 4905. [CrossRef]
21. Chen, S. ; Wang, C. ; Dai, H. ; Zhang, H. ; Poêle, F. ; Xi, X. ; Yan, Y. ; Wang, P. ; Yang, X. ; Zhu, X. ; et coll. Basé sur la reconstruction du pylône électrique sur les structures de modèles abstraits utilisant des données LiDAR aéroportées. Remote Sens.2019 , 11, 1579. [CrossRef]
22. Silva, F. ; Amaro, N. Classification des tours de transmission utilisant la similarité des nuages de points. Dans les actes de l'APCA International Conférence sur le contrôle automatique et le soft computing, Caparica, Portugal, 6-8 juillet 2022 ; pp. 609-618.
23. Chen, Z. ; Lan, Z. ; Longue, H. ; Hu, Q. Modélisation 3D du pylône à partir de données LiDAR aéroportées. Dans Actes de la télédétection de l'environnement : 18e Symposium national sur la télédétection de Chine, Wuhan, Chine, 14 mai 2014 ; p. 915807.
24. Wang, H. ; Cabane.; Wang, Z. ; Kang, Z. ; Akwensi, PH; Yang, J. Reconstruction de pylônes électriques à partir de nuages de points LiDAR basée sur la segmentation structurelle et l'estimation des paramètres. Géosci IEEE. Télédétection Lett. 2022, 19, 1–5. [Référence croisée]
25. Zhang, M. ; Su, X. ; Xu, H. ; Li, H. ; Wang, D. Identification de la catégorie de tour de transmission à partir de nuages de points LiDAR aéroportés basée sur la courbe de forme. Dans Actes de la 3e Conférence internationale sur la mécatronique, l'automatisation et le contrôle intelligent, Guilin, Chine, 15-17 septembre 2023 ; p. 012026. [Réf. croisée]
26. Principi, E. ; Squartini, S. ; Cambria, E. ; Piazza, F. Correspondance de modèles acoustiques pour la détection automatique des états d'urgence : un ELM Algorithme basé. Neuroinformatique 2015, 149, 426-434. [Référence croisée]
27. Obaïd, M. ; Hodrob, R. ; Abou Mwais, A. ; Aldababsa, M. Reconnaissance automatique de la parole de petits mots isolés pour Commandes à un seul mot en arabe parlé. Informatique douce. 2023, 1-14. [Référence croisée]
28. Salvador, S. ; Chan, P. Vers une déformation temporelle dynamique précise dans le temps et l'espace linéaires. IDA 2007, 11, 561-580. [Référence croisée]
29. Gao, Y. ; Yang, Y. ; Peut.; Xu, W. Étude sur le diagnostic intelligent des aiguillages ferroviaires basé sur une segmentation améliorée de FastDTW et de séries chronologiques sous surveillance du Big Data. Mathématiques. Problème. Ing. 2022, 2022, 7048813. [CrossRef]
30. Yeo, K. ; Yin, OS ; Han, PY; Kwee, WK Application mobile en temps réel de signature dans l'air avec déformation temporelle dynamique rapide (FastDTW). Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2015 sur les applications de traitement du signal et des images (ICSIPA), Kuala Lumpur, Malaisie, 19-21 octobre 2015 ; pp. 315-320.
31. Barbay, J. Calcul adaptatif de la distance discrète de Fréchet. Dans Actes du traitement des chaînes et de la recherche d'informations, Lima, Pérou, 14 septembre 2018 ; pp. 50-60.
32. Avraham, RB; Filtser, O. ; Kaplan, H. ; Katz, MJ; Sharir, M. La distance de Fréchet discrète et semi-continue avec raccourcis via Comptage et sélection de distances approximatives. ACM Trans. Algorithmes 2015, 11, 1–29. [Référence croisée]
33. Ali, M. ; Hussein, Z. ; Yang, MS. Mesures de distance et de similarité de Hausdorff pour les ensembles neutrosophiques à valeur unique avec application dans la prise de décision multicritère. Électronique 2022, 12, 201. [CrossRef]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Algorithme de détection et de suivi de véhicules multi-objets basé sur YOLOv8 et ByteTrack améliorés

Longxiang You, Yajun Chen*, Ci Xiao, Chaoyue Sun et Rongzhen Li

École d'ingénierie de l'information électronique, China West Normal University, Nanchong 637009, Chine ; ylxxzxx@stu.cwnu.edu.cn (LY); xiaoci035560@stu.cwnu.edu.cn (CX); sunchaoyue@stu.cwnu.edu.cn (CS); lee1225rz@stu.cwnu.edu.cn (RL)
* Correspondance : scnccyj@cwnu.edu.cn

Résumé : La technologie de détection et de suivi des véhicules joue un rôle crucial dans les systèmes de transport intelligents. Cependant, en raison de facteurs tels que des scénarios complexes, des échelles diverses et des occlusions, des problèmes tels que de fausses détections, des détections manquées et des changements d'identité surviennent fréquemment. Pour résoudre ces problèmes, cet article propose un algorithme de détection et de suivi de véhicules multi-objets basé sur CDS-YOLOv8 et ByteTrack amélioré. Pour la détection des véhicules, le module Context-Guided (CG) est introduit pendant le processus de sous-échantillonnage pour améliorer les capacités d'extraction de fonctionnalités dans des scénarios Le bloc de réparation dilaté (DRB) est reconstruit pour résoudre les problèmes à plusieurs échelles, et Soft-NMS remplace le NMS traditionnel pour améliorer les performances dans les scénarios de véhicules densément peuplés. Pour le suivi des véhicules, le vecteur d'état et la matrice de covariance du filtre de Kalman ont été améliorés pour mieux gérer le mouvement non linéaire des véhicules, et l'interpolation lissée gaussienne (GSI) est introduite pour combler les écarts de trajectoire causés par les échecs de détection. Les expériences menées sur l'ensemble de données UA-DETRAC montrent que l'algorithme amélioré augmente les performances de détection, avec mAP@0,5 et mAP@0,5:0,95 améliorant respectivement de 9 % et 8,8 %. En termes de performances de suivi, mMOTA s'améliore de 6,7 %. De plus, des expériences comparatives avec des algorithmes de détection traditionnels et de suivi en deux étapes démontrent les performances supérieures de l'algorithme proposé.

Mots-clés : vision par ordinateur ; systèmes de transport intelligents; détection de véhicules; suivi des véhicules

check for updates

Citation : Vous, L. ; Chen, Y. ; Xiao, C. ; Soleil, C. ; Li, R. Algorithme de détection et de suivi de véhicules multi-objets basé sur YOLOv8 et ByteTrack améliorés. Électronique 2024, 13, 3033. https://doi.org/10.3390/electronique13153033

Rédacteur académique : Fernando De la Prieta Pintado

Reçu : 11 juillet 2024
Révisé : 29 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

La technologie de détection et de suivi des véhicules joue un rôle clé dans les systèmes de transport intelligents [1]. L'utilisation de cette technologie permet de surveiller en temps réel le flux du trafic routier, aidant ainsi les autorités de gestion du trafic à prendre des décisions éclairées pour réduire efficacement les embouteillages. De plus, la technologie de détection et de suivi des véhicules peut identifier les infractions au code de la route, réduisant ainsi le risque d'accidents de la route. Cette technologie offre également une perception intelligente des véhicules et des environnements routiers, offrant ainsi des solutions plus intelligentes et plus efficaces pour la gestion du trafic. Ces dernières années, la technologie de l'IA a joué un rôle important dans l'amélioration des capacités des réseaux de véhicules. Par exemple, dans le domaine de l'informatique en réseau embarquée pour les véhicules, Y Ju et al. [2] ont mené des recherches sur le déchargement sécurisé en utilisant la technologie d'accès multiple non orthogonal (NOMA) et l'apprentissage par renforcement asynchrone. Cela améliore non seulement la sécurité et l'efficacité de la transmission des données, mais répond également aux exigences en temps réel en matière de détection et de suivi des véhicules.

Cependant, plusieurs défis sont souvent rencontrés lors de la détection et du suivi des véhicules. Des facteurs tels que les variations complexes de l'éclairage, les impacts météorologiques, la diversité des types et des tailles de véhicules et les scènes de circulation à haute densité peuvent réduire considérablement l' efficacité de la détection et du suivi. En réponse à ces défis, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris. Par exemple, D. Roy et al. [3] ont amélioré les performances de détection et de suivi des véhicules en introduisant des informations multimodales. M. Humayun et al. [4], basé sur YOLOv4, a abordé les variations de diverses conditions météorologiques en ajoutant un bloc de pooling pyramidal spatial. P. Deshmukh et coll. [5] a utilisé le Swin Transformer pour extra

Machine Translated by Google

fonctionnalités multi-échelles et utilisé un réseau pyramidal de fonctionnalités bidirectionnel pour gérer la diversité des échelles de véhicules. J. Wang et coll. [6], basé sur YOLOv5, a introduit un mécanisme d'attention pour améliorer les performances de détection des petits véhicules et a utilisé l' algorithme JDE pour le suivi des véhicules. T. Bui et al. [7], également basé sur YOLOv5, a introduit un module d'interaction de fonctionnalités intra-échelle basé sur l'attention pour accélérer la convergence du réseau de détection et amélioré ResNet36 en tant que réseau d'extraction de fonctionnalités DeepSORT pour le suivi des véhicules. En plus d'améliorer les modèles de détection d'objets et les méthodes de suivi des véhicules basées sur le filtre de Kalman, plusieurs solutions technologiques ont été proposées pour relever ces défis. Y Wu et al. [8] ont proposé une technique utilisant un réseau contradictoire génératif (GAN) pour convertir des ensembles de données de véhicules diurnes en ensembles de données nocturnes, améliorant ainsi les performances de détection nocturne du point de vue de l'expansion des ensembles de données.

B Xu et coll. [9] ont introduit un cadre de vision monoculaire qui utilise un modèle d'inpainting d'image pour restaurer les véhicules obstrués grâce au masquage, améliorant ainsi les performances dans les scénarios de circulation encombrée. De plus, B Xu et al. [10] ont utilisé une méthode combinant la détection des points clés et plusieurs modèles d'apprentissage profond, optimisant la détection et le suivi des points de charge des essieux des véhicules en intégrant les modèles YOLO-v5 et HourglassNet avec un modèle dynamique. H Xu et coll. [11] ont proposé un modèle de détection de voiture inter-domaines avec un modèle de détection de véhicule à mécanisme d'attention de bloc convolutionnel intégré (CDCDMA) qui construit un cadre de détection d'objets inter-domaines, mettant l'accent sur les fonctionnalités des phares pour gérer les changements dans des scènes complexes. C Zhang et coll. [12] ont introduit un cadre système qui répond aux défis de réidentification des véhicules à travers les vues en apprenant des relations d'ordre élevé et des informations topologiques. Ce cadre améliore efficacement la précision de la reconnaissance dans différentes vues grâce au module d'extraction de caractéristiques, au module de convolution graphique et au module de correspondance de graphiques.

Dans le domaine de la détection de véhicules, la plupart des méthodes sont généralement optimisées pour des scénarios uniques . Pour résoudre ce problème, cet article propose un algorithme amélioré basé sur YOLOv8 [13]—CDS- YOLOv8. Cet algorithme introduit le module Context-Guided [14] pendant le processus de sous-échantillonnage pour améliorer les capacités d'extraction de caractéristiques, s'adaptant ainsi aux variations de scènes complexes. Simultanément, la structure du Dilated Reparam Block [15] est reconstruite et intégrée au module C2f pour extraire complètement les caractéristiques multi-échelles et clairsemées, améliorant ainsi les performances du modèle dans la détection d'objets multi-échelles. De plus, au cours de la phase de post-traitement , l'algorithme adopte Soft-NMS pour remplacer le NMS traditionnel, préservant ainsi des cases candidates plus valides dans les scènes de véhicules densément peuplées grâce à une diminution douce de la confiance. En termes de suivi des véhicules, la plupart des algorithmes de suivi se concentrent généralement uniquement sur les zones de détection à haut niveau de confiance tout en ignorant celles à faible niveau de confiance, ce qui conduit à des détections manquées de certaines cibles réelles. Pour résoudre ce problème, cet article sélectionne ByteTrack [16] comme outil de suivi de base et effectue des ajustements au vecteur d'état et à la matrice de covariance dans le filtre de Kalman. De plus, l'interpolation gaussienne lissée [17] est introduite pour post-traiter les trajectoires des véhicules, compensant les trajectoires manquantes.

Les principales contributions de cet article sont résumées comme suit : 1. Nous avons proposé un modèle de détection de véhicules amélioré, CDS-YOLOv8 : Pour répondre aux limites de YOLOv8 dans les environnements urbains pour la détection de véhicules, le modèle CDS-YOLOv8 introduit un module CG lors du sous-échantillonnage pour améliorer les capacités d'extraction de fonctionnalités en réponse à des changements de scène complexes. Il reconstruit le DRB pour mieux gérer les problèmes multi-échelles causés par les différentes distances des caméras et la taille des véhicules. De plus, Soft-NMS remplace le NMS traditionnel pour conserver des cases candidates plus valides, améliorant ainsi les performances dans les scènes de véhicules densément peuplées.

2. Nous avons amélioré le tracker ByteTrack : ByteTrack a été sélectionné comme tracker de base. Pour remédier aux limites du filtre de Kalman original dans la capture du mouvement du véhicule, des améliorations ont été apportées au vecteur d'état et à la matrice de covariance afin de mieux gérer les changements non linéaires du mouvement du véhicule. Pour atténuer les interruptions de piste dues à une perte de détection, GSI a été utilisé pour combler les lacunes de suivi, améliorant ainsi la continuité des pistes et réduisant les changements d'identité et la perte de piste.

Machine Translated by Google

3. L'intégration du détecteur et du tracker améliorés a été réalisée : CDS-YOLOv8 et le ByteTrack amélioré ont été combinés et validés sur des ensembles de données publics. Les résultats expérimentaux indiquent que cette méthode démontre des performances avancées et une supériorité sur plusieurs paramètres.

2. Travaux connexes

2.1. Détection de véhicules

Ces dernières années, avec le développement rapide de la technologie du deep learning, des progrès significatifs ont été réalisés dans le domaine de la détection d'objets. Les méthodes de détection d'objets basées sur l'apprentissage profond peuvent être divisées en approches en une ou deux étapes. L'avantage des méthodes en une étape réside dans leur vitesse de traitement rapide, car elles génèrent directement des catégories d'objets et des cadres de délimitation via un réseau unique. En revanche, les méthodes en deux étapes génèrent d'abord des régions candidates, puis effectuent une détection fine, avec l'avantage d'une précision de détection plus élevée. Les méthodes représentatives en une étape incluent la série YOLO, SSD [18] et RetinaNet [19], tandis que les méthodes représentatives en deux étapes incluent Faster R-CNN [20] et Cascade R-CNN [21]. Le principe de fonctionnement de la série YOLO est de diviser l'image d'entrée en une grille de taille fixe, chaque grille prédisant directement l'emplacement et la probabilité de catégorie de l'objet. SSD extrait les cadres de délimitation et les catégories d'objets sur des cartes de caractéristiques à différentes échelles, permettant ainsi une détection multi-échelle. RetinaNet utilise un réseau pyramidal de fonctionnalités pour l'extraction de fonctionnalités et introduit la perte focale pour résoudre le problème du déséquilibre des classes. Faster R-CNN génère d'abord des régions candidates via un réseau de propositions de région, puis effectue une classification fine des objets et une régression du cadre de délimitation sur ces régions. Cascade R-CNN, s'appuyant sur Faster R-CNN, introduit une structure de régression et de classification en plusieurs étapes qui affine progressivement les régions candidates, améliorant ainsi encore la précision de la détection.

Pour répondre aux besoins pratiques de la détection des véhicules, plusieurs efforts de recherche ont optimisé davantage les détecteurs généraux. Z. Chen et al. [22] ont proposé une méthode améliorée basée sur le SSD en introduisant des mécanismes d'attention de canal et des modules de déconvolution pour la fusion de fonctionnalités, améliorant ainsi les performances de détection des véhicules. L. Kang et coll. [23] ont présenté une méthode d'attention floue de type 1 basée sur YOLOv5 pour améliorer la détection des véhicules. Cette approche optimise les performances de détection en focalisant le détecteur sur le centre cible.

M. Bie et coll. [24] ont proposé un réseau pyramidal de fonctionnalités bidirectionnel basé sur YOLOv5 pour améliorer les capacités d'extraction de fonctionnalités du modèle. B. Wang et al. [25] ont introduit une méthode améliorée basée sur YOLOv8 en incorporant le mécanisme d'attention BiFormer et le réseau BiFPN pour améliorer les capacités de fusion de fonctionnalités.

En termes de sélection d'algorithmes de détection, YOLOv8 atteint un bon équilibre entre vitesse, précision et taille du modèle grâce à sa vitesse de détection rapide, sa haute précision et sa taille compacte. Par conséquent, cet article propose un algorithme CDS-YOLOv8 basé sur YOLOv8 pour résoudre les problèmes de détection de véhicules dans des conditions météorologiques complexes, une diversité d'échelle et des environnements de véhicules denses. Sans augmenter la charge de calcul, cet algorithme améliore efficacement les performances de détection des véhicules.

2.2. Suivi de véhicules multi-cibles

Les algorithmes de suivi multi-cibles basés sur la détection peuvent être divisés en méthodes à une ou deux étapes. Les méthodes en une seule étape utilisent généralement une structure de bout en bout, fusionnant la détection et l'association d'objets en une seule étape pour produire directement des résultats de détection et de suivi, avec l'avantage de solides performances en temps réel. Les méthodes en deux étapes effectuent d'abord la détection d'objets, puis effectuent une association d'objets, offrant une plus grande précisio
Les méthodes typiques en une seule étape incluent JDE [26] et FairMOT [27]. JDE complète la détection et l'intégration des objets dans le même réseau, les parties de détection et d'intégration partageant la plupart des paramètres du réseau. FairMOT intègre les réseaux de détection d'objets et de ReID dans un seul réseau, mais traite les tâches de détection et de réidentification via des branches indépendantes.

Machine Translated by Google

Les algorithmes de suivi en deux étapes typiques incluent la série SORT. SORT [28], proposé par A. Bewley et al., utilise Faster R-CNN comme détecteur dans l'étape de détection pour générer des informations sur l'emplacement et la catégorie de l'objet. L'étape de suivi complète l'association de trajectoire en combinant le filtre de Kalman et l'algorithme hongrois. Par la suite Wojke et coll. a proposé l'algorithme DeepSORT [29] qui, comparé à SORT, introduit la méthode ReID, utilisant un réseau d'extraction de caractéristiques pour obtenir les caractéristiques d'apparence des objets et effectuant une correspondance en cascade des caractéristiques d'apparence et une intersection sur union (IoU) lors de l'association de données. StrongSORT améliore encore l'extraction des caractéristiques d'apparence, la gestion du bruit de mouvement et la compensation du mouvement de la caméra basée sur DeepSORT, et complète et optimise les trajectoires avec des détections et des associations manquantes . Y. Zhang et al. [16] ont proposé l'algorithme ByteTrack, qui améliore les performances de suivi en associant presque toutes les cases de détection. Suite à cela, N. Aharon et al. ont proposé l'algorithme BoT-SORT [30] , qui améliore le filtre de Kalman sur la base de ByteTrack, en ajoutant une compensation de mouvement de caméra et la méthode ReID.

Dans les scénarios de suivi des véhicules, Z. Zhao et al. [31] ont conçu une nouvelle stratégie de notation commune basée sur le cadre JDE et ont introduit les encodeurs CBAM et Transformer pour améliorer les capacités de détection, améliorant ainsi les performances de suivi. K. Zhang et al. [32] ont incorporé le mécanisme d'attention CAENet dans YOLOX pour améliorer la détection des véhicules et ont utilisé DeepSORT pour le suivi des véhicules. G. Han et al. [33] ont suivi les véhicules basés sur FairMOT, optimisé le réseau DLA-34 pour améliorer les performances de détection et introduit une fonction de perte conjointe pour réduire les problèmes de changement d'identité.

Comparés aux algorithmes de suivi en une seule étape, les algorithmes de suivi en deux étapes sont plus flexibles et atteignent une plus grande précision dans des scénarios complexes. Par conséquent, cet article choisit d' améliorer ByteTrack basé sur CDS-YOLOv8 pour la détection et le suivi des véhicules. Contrairement à la plupart des méthodes de suivi qui ignorent les cases de détection à faible score, ByteTrack prend pleinement en compte les cases de détection à faible score dans l'association de trajectoire, résolvant ainsi efficacement le problème des fragments de trajectoire manquants. Par exemple, lorsqu'une occlusion partielle se produit, les scores de la zone de détection peuvent varier de élevé à faible. En prenant en compte les cases de score de faible confiance, ByteTrack peut identifier les cibles partiellement obstruées, réduisant ainsi l'incidence des détections manquées.

3. Méthodes

Dans le processus de détection et de suivi du véhicule, le détecteur CDS-YOLOv8 génère d'abord les boîtes de détection pour la trame actuelle. Le filtre de Kalman amélioré prédit ensuite les cadres de délimitation de la trame actuelle grâce à la prédiction des tracklets. Par la suite, les cases de détection et les cases prédites sont mises en correspondance à l'aide de l'algorithme hongrois, IoU servant de base à l'association. Le processus spécifique d'appariement secondaire est illustré dans la figure 1.

Les boîtes de détection produites à l'aide de CDS-YOLOv8 sont divisées en boîtes de confiance élevée et en boîtes de confiance faible en fonction de leurs scores de confiance, suivies de deux cycles de traitement d'association. Lors du premier cycle d'association, le filtre de Kalman amélioré prédit les tracklets suivis et les tracklets perdus, puis associe les cases de haute confiance aux cases prédites. Si la correspondance réussit, l'état du tracklet est mis à jour ; dans le cas contraire, les tracklets suivis qui ne correspondent pas aux boîtes de confiance élevée subissent un deuxième cycle d'association avec des boîtes de faible confiance. Au deuxième tour d'association, si la correspondance réussit, l'état du tracklet est mis à jour ; sinon, la tracklet entre dans l' état perdu. Dans la gestion des tracklets, les tracklets qui restent sans correspondance pendant plus de 30 images sont supprimés. De nouveaux tracklets sont attribués à des boîtiers de détection de haute confiance inégalés. Enfin, après la détection et le suivi des véhicules, GSI est utilisé pour combler les lacunes dans les trajectoires causées par des détections manquantes, optimisant ainsi la continuité et l'exhaustivité des trajectoires.

Le modèle CDS-YOLOv8 est composé de trois parties : la colonne vertébrale, le cou et la tête, comme illustré dans la figure 2 :

Machine Translated by Google

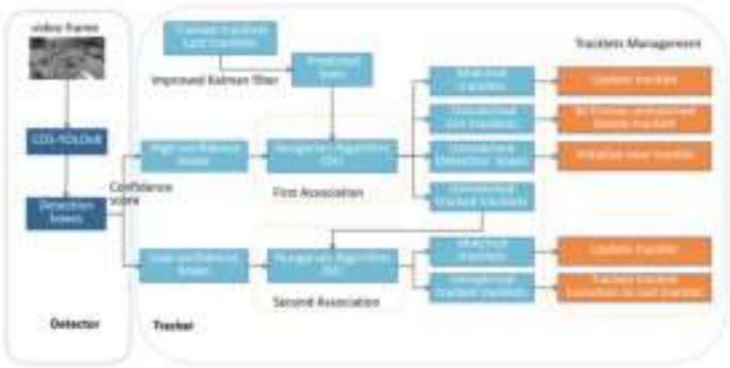


Figure 1. Organigramme de détection et de suivi des véhicules.

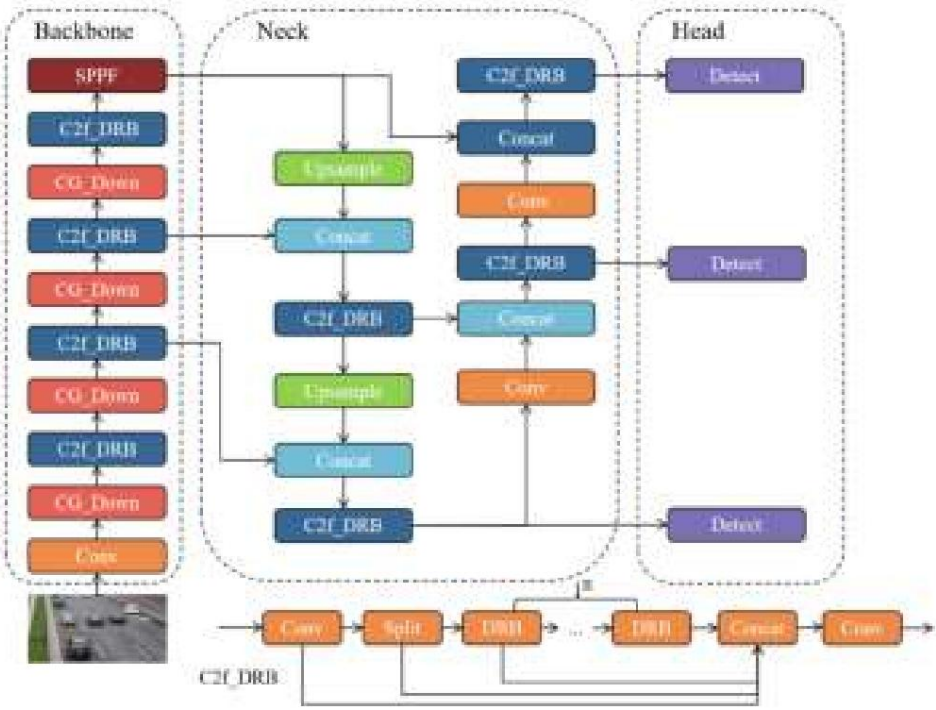


Figure 2. Structure de CDS-YOLOv8.

Dans la figure 2, le Backbone est utilisé pour l'extraction de fonctionnalités, en extrayant les fonctionnalités à plusieurs niveaux de l'image d'entrée. The Neck est responsable de la fusion des fonctionnalités, combinant des fonctionnalités profondes et peu profondes à l'aide de FPN et PAN. La tête contient trois têtes de détection, qui gèrent des cartes de caractéristiques à différentes échelles et génèrent les informations de position et de catégorie des boîtes de détection. Le CDS-YOLOv8 comble les lacunes de YOLOv8 dans la détection des véhicules urbains avec les améliorations suivantes : Le module CG est introduit lors du sous-échantillonnage, ce qui améliore l'extraction de caractéristiques dans des environnements complexes en combinant des informations contextuelles locales et environnantes et en utilisant des informations globales pour la pondération. Dans le Backbone et le Neck, la structure DRB est restructurée et intégrée au module C2f pour mieux répondre aux problèmes de diversité d'échelle. Dans la phase de post-traitement, Soft-NMS remplace le NMS traditionnel, évitant l'élimination agressive des boîtes candidates et améliorant les performances de détection en occlusion partielle.

3.1. Sous-échantillonnage guidé par le contexte

Les environnements dans lesquels les véhicules circulent incluent des scénarios complexes tels que la nuit, un temps nuageux, des journées ensoleillées et des jours de pluie. Pour améliorer les capacités d'extraction de fonctionnalités dans ces environnements complexes, le module contextuel est introduit lors de

Machine Translated by Google

processus de sous-échantillonnage. Le module CG comprend plusieurs composants clés : L' extracteur de caractéristiques locales utilise la convolution standard pour extraire les caractéristiques locales de l'image, fournissant des caractéristiques fines et des informations sur les limites. L'extracteur de contexte environnant utilise la convolution dilatée pour élargir le champ de réception des caractéristiques locales, capturant ainsi un plus large éventail d'informations contextuelles. L'extracteur de caractéristiques conjointes concatène les caractéristiques locales et les caractéristiques contextuelles environnantes et les traite avec la normalisation par lots (BN) et l'activation SiLU, formant ainsi des caractéristiques conjointes qui améliorent les capacités d'expression non linéaire. L'extracteur de contexte global regroupe les informations contextuelles globales de l'image entière via le regroupement moyen global et les traite ultérieurement à l'aide d'un perceptron multicouche. Cela applique des pondérations aux caractéristiques communes, amplifiant les informations utiles tout en supprimant les informations non pertinentes. La structure du module CG est illustrée dans la figure 3 :

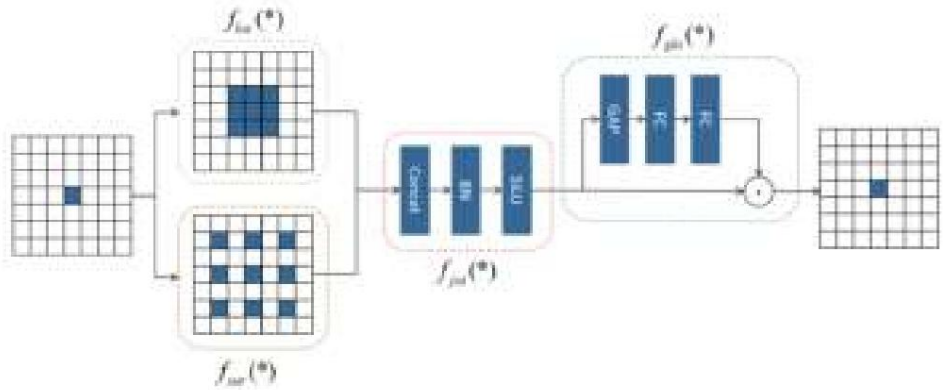


Figure 3. Structure du module guidé par le contexte.

En détail, tout d'abord, la carte des caractéristiques d'entrée subit une convolution 3 × 3 pour extraire les caractéristiques locales, et une convolution 3 × 3 avec un taux de dilatation de 2 pour extraire les caractéristiques contextuelles environnantes. Ensuite, l'extracteur de caractéristiques conjointes fusionne les caractéristiques locales et les caractéristiques contextuelles environnantes le long de la dimension du canal, suivi de la couche BN et de l'activation de SiLU . Enfin, l'extracteur de contexte global exploite les informations globales de l'image, en utilisant le regroupement de moyennes globales pour générer un vecteur de caractéristiques global pour chaque canal. Ce vecteur est ensuite soumis à une transformation non linéaire à travers deux couches entièrement connectées, produisant des poids de canal. Ces pondérations sont appliquées aux caractéristiques communes pour une optimisation pondérée, améliorant les caractéristiques importantes tout en supprimant celles sans importance, augmentant ainsi la capacité d'extraction de caractéristiques du modèle.

3.2. Bloc de réparation dilaté reconstruit

Dans la détection de véhicules, des variations d'échelle significatives surviennent en raison des différences dans les distances des caméras et les tailles des véhicules. Pour résoudre ce problème, nous avons reconstruit le bloc Dilated Reparam et l'avons intégré dans la structure C2f. La structure DRB comprend une couche de convolution à gros noyau et plusieurs couches de convolution dilatées à petit noyau. La couche de convolution à grand noyau capture des caractéristiques spatiales plus larges, tandis que les couches de convolution dilatées à petit noyau capturent des caractéristiques spatiales clairsemées grâce à des opérations de dilatation. Les sorties de ces couches sont traitées via la couche BN puis résumées. En utilisant des techniques de reparamétrage, ils sont représentés de manière équivalente comme une seule couche de convolution à grand noyau . Cette conception présente deux avantages principaux : les couches de convolution à petit noyau, en incorporant une dilatation, capturent des caractéristiques sur une plage plus large. Lorsqu'il est combiné avec la couche de convolution à grand noyau, le champ de réception est efficacement étendu, éliminant ainsi le besoin d'augmenter la profondeur du modèle ou de concevoir des noyaux de convolution plus grands. Lors de l'inférence, les techniques de reparamétrage fusionnent plusieurs couches de convolution en un seul noyau de convolution équivalent, conservant la taille du noyau et la complexité de calcul tout en améliorant considérablement la capacité d'extraction de caractéristiques du modèle. La figure 4 illustre la structure DRB.

Machine Translated by Google

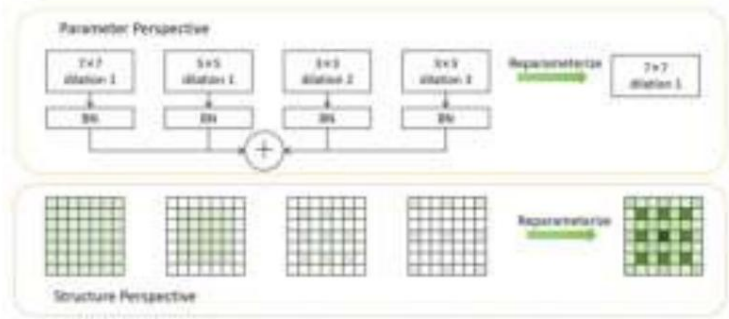


Figure 4. Structure du bloc de réparation dilaté.

Du point de vue des paramètres, le DRB se compose d'une couche de convolution à grand noyau 7 × 7 et de trois couches de convolution à petit noyau avec des taux de dilatation différents. Les sorties de toutes les couches de convolution sont traitées via des couches BN et sont représentées de manière équivalente comme une seule couche de convolution à grand noyau 7 × 7 pendant l'inférence, sans augmenter significativement la charge de calcul.

Structurellement, la figure 4 montre comment chaque couche de convolution correspond à des zones en fonction de la taille du noyau et du taux de dilatation. Pour les gros objets, le DRB étend efficacement le champ de réception en combinant des couches de convolution à grand noyau avec des couches de convolution dilatées. Pour les petits objets, les couches de convolution dilatées du DRB, utilisant de petits noyaux et des taux de dilatation variables, capturent efficacement des caractéristiques à grain fin, améliorant ainsi les performances de détection de véhicules à plusieurs échelles dans des arrière-plans complexes.

3.3. Soft-NMS

Dans le processus de détection et de suivi des véhicules, Soft-NMS est utilisé pour remplacer le NMS traditionnel afin d'améliorer les performances dans les scénarios de véhicules densément peuplés. Les étapes traditionnelles du NMS sont les suivantes :

1. Triez les cases des candidats par ordre décroissant en fonction de leurs scores de confiance. 2. Sélectionnez la case candidate avec le score de confiance le plus élevé et ajoutez-la à l'ensemble de résultats final.
3. Calculez l'IoU entre cette case candidate et les autres cases. Si l'IoU d'une boîte candidate dépasse un seuil défini, elle est supprimée.
4. Parmi les cases de candidats restantes, sélectionnez celle avec le score de confiance le plus élevé et répétez les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que toutes les cases de candidats aient été traitées.

Soft-NMS optimise la troisième étape du NMS traditionnel : dans Soft-NMS, après avoir calculé l'IoU entre la case candidate avec le score de confiance le plus élevé et les autres cases, au lieu de supprimer ces cases avec une IoU dépassant le seuil, une méthode de manipulation douce est utilisé en dégradant leurs scores de confiance. Plus précisément, nous adoptons une méthode de désintégration gaussienne, comme le montre l'équation (1) :

$$si = si \times \exp - \frac{IoU2}{\sigma} \quad (1)$$

où si représente le score de confiance de la i-ème boîte candidate et σ est le facteur de décroissance.

Si le score de confiance dégradé est inférieur au seuil défini, la case candidat sera supprimée. Dans les scénarios avec des véhicules denses, le chevauchement des cases candidates entre les cibles est important. Par rapport au NMS traditionnel, Soft-NMS peut conserver davantage de cases candidates valides, gérer plus efficacement les cibles adjacentes et réduire l'apparition de détections manquées.

3.4. Filtre de Kalman amélioré

Dans les algorithmes de suivi en deux étapes, la sortie de la boîte englobante est généralement estimée à l'aide du filtre de Kalman (KF) pour déterminer l'état de mouvement de la cible. Dans ByteTrack, le vecteur d'état du filtre de Kalman est illustré dans l'équation (2) :

Machine Translated by Google

$$x = xc, yc, a, h, \quad \dot{xc}, \dot{yc}, \dot{a}, \dot{h}^{T} \tag{2}$$

où xc, yc sont les coordonnées du centre, a est le rapport hauteur/largeur et h est la hauteur.

Ensuite, face à l'occlusion partielle et aux changements de perspective, le rapport hauteur/largeur est difficile à adapter. Par conséquent, estimer directement la largeur et la hauteur est un meilleur choix. Le vecteur d'état amélioré est présenté dans l'équation (3) :

$$xk = xc(k), yc(k), w(k), h(k), \dot{xc}(k), \dot{yc}(k), \dot{w}(k), \dot{h}(k) \tag{3}$$

où (xc (k), yc (k) sont les coordonnées du centre, w(k) est la largeur et h(k) est la hauteur.

Par rapport à l'utilisation du rapport hauteur/largeur, l'estimation directe de la largeur et de la hauteur présente les avantages suivants : d'une part, elle peut refléter plus précisément la taille réelle de l'objet et mieux s'adapter aux changements dans les dimensions du véhicule ; d'un autre côté, les changements dans la forme et la taille du véhicule pendant le mouvement sont complexes, et l'utilisation du rapport hauteur/largeur augmente les erreurs non linéaires. L'estimation directe de la largeur et de la hauteur peut réduire la distorsion du cadre de délimitation causée par l'accumulation d'erreurs, maintenant ainsi une meilleure stabilité dans les scènes complexes.

Dans le filtre de Kalman classique, la matrice de covariance du bruit de processus Q et la matrice de covariance du bruit de mesure R sont définies comme des valeurs fixes, qui restent inchangées tout au long du processus de suivi. Pour améliorer les performances du filtre de Kalman dans des environnements dynamiques, Q et R sont ajustés dynamiquement en fonction des conditions en temps réel, Q comme indiqué dans l'équation (4) et R comme indiqué dans l'équation (5).

$$Qk = \text{diagnostic} \begin{matrix} \sigma pw\hat{}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma ph\hat{}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma pw\hat{}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma ph\hat{}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma vwk_{-1|k-1}^{2}, \sigma vh\hat{}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma vwk_{-1|k-1}^{2}, \sigma vh\hat{}_{k-1|k-1}^{2} \end{matrix} \tag{4}$$

où σp est l'écart type du bruit de position et σp est l'écart type du bruit de vitesse.

$$Rk = \text{diag} \begin{matrix} \sigma mw\hat{}_{k|k-1}^{2}, \sigma mh\hat{}_{k|k-1}^{2}, \\ \sigma mw\hat{}_{k|k-1}^{2}, \sigma mh\hat{}_{k|k-1}^{2} \end{matrix} \tag{5}$$

où σm est l'écart type du bruit de mesure.

Les valeurs Q et R variables dans le temps peuvent répondre de manière plus flexible aux changements non linéaires de l'environnement , tels que la décélération ou l'accélération d'un véhicule. Par rapport aux matrices de covariance fixes , les valeurs Q et R variables dans le temps peuvent être ajustées en fonction des états actuels de prévision et de mesure, résolvant ainsi plus efficacement les problèmes de bruit et d'accumulation d'erreurs. Cela permet une meilleure adaptation aux environnements dynamiques et améliore les performances globales du système.

3.5. Interpolation lissée gaussienne Pour

résoudre le problème de la perte de trajectoire causée par des omissions de détection dans le suivi des véhicules, la méthode d'interpolation lissée gaussienne est utilisée comme étape de post-traitement pour l'optimisation. Les méthodes d'interpolation linéaire traditionnelles s'appuient généralement uniquement sur les positions de deux points finaux, ignorant la complexité du mouvement du véhicule, ce qui donne des résultats moins précis. GSI capture la trajectoire de mouvement non linéaire du véhicule grâce à la régression du processus gaussien (GPR), fournissant ainsi des résultats plus précis.

Pour la ième trajectoire du véhicule, le modèle GSI est représenté par l'équation (6) :

$$pt = f(i)(t) + \tag{6}$$

Machine Translated by Google

où t est l'ID de la trame, pt est la coordonnée de position du véhicule à la trame t, f (i) (t) est la fonction ajustée par GPR utilisée pour décrire la trajectoire du véhicule, et $N(0, \sigma^2)$ représente le bruit gaussien.

Le processus gaussien est une puissante méthode bayésienne non paramétrique qui peut capturer les relations non linéaires entre les points de données, en supposant que la fonction f (i) suit un Processus gaussien, comme le montre l'équation (7) :

$$f(i) \sim GP(0, k(x, x')) \quad (7)$$

où la fonction de covariance k(x, x′) est le noyau de la fonction de base radiale (RBF), particulièrement sensible aux changements locaux. Plus les points de données sont proches, plus leur corrélation est élevée, et la réponse du noyau RBF diminue rapidement à mesure que la distance entre les points de données augmente. Cette caractéristique rend le noyau RBF plus adapté à la description des changements non linéaires dans le mouvement du véhicule, tels que le démarrage, le virage, l'accélération ou la décélération. spécifiquement représenté comme le montre l'équation (8) :

$$k(x, x') = \exp\left(-\frac{|x' - x|^2}{2\lambda^2}\right) \quad (8)$$

Le processus de prédiction et d'interpolation de la position de la trajectoire est le suivant : pour les trames avec des détections manquantes, la position lissée P est prédite comme le montre l'équation (9) :

$$P^* = K(F^*, F)\left[K(F, F) + \sigma^2 I\right]^{-1} P \quad (9)$$

où K(·, ·) est la matrice de covariance basée sur la fonction de covariance k(·, ·), I est la matrice d'identité et P représente les positions connues des véhicules sur la trajectoire.

De plus, pour la fonction noyau RBF, le paramètre d'échelle λ détermine sa sensibilité aux changements de données. Lors du suivi du véhicule, différentes longueurs de trajectoire du véhicule peuvent correspondre à différents modèles de mouvement. Par conséquent, en ajustant λ pour s'adapter à la longueur l de la trajectoire du véhicule, les trajectoires peuvent être lissées, réduisant ainsi le bruit et obtenant un suivi plus fluide et plus précis. Le réglage de λ est indiqué dans l'équation (10) :

$$\lambda = \tau \cdot \log\left(\frac{3}{l}\right) \quad (10)$$

où τ est une constante utilisée pour contrôler le degré de lissage, qui a été fixé à 18 sur la base des résultats expérimentaux obtenus par recherche par grille.

Grâce aux étapes ci-dessus, GSI peut combler efficacement les trajectoires manquantes dans le véhicule suivi, améliorant la précision et la stabilité des prévisions de trajectoire.

4. Expériences et résultats 4.1.

Ensemble de données et configuration expérimentale

L'ensemble de données UA-DETRAC [34], publié conjointement par l'Université de l'Alberta et l' Université des sciences et technologies de Chine, sert d'ensemble de données de référence spécialement conçu pour la détection et le suivi de véhicules multi-objets. Cet ensemble de données comprend 10 h de vidéo capturée à l'aide d'un appareil photo Canon EOS 550D (Canon USA, Inc., Lake Success, NY, USA). Les vidéos sont enregistrées à une fréquence d'images de 25 images par seconde, comprenant plus de 140 000 images et 1,21 million de zones de détection d'objets annotées. L'ensemble de formation comprend 60 séquences vidéo, totalisant 83 791 images, tandis que l'ensemble de test comprend 40 séquences vidéo, totalisant 56 340 images. L'ensemble de données UA-DETRAC présente divers défis, avec des scénarios représentatifs illustrés dans la figure 5. L'ensemble de données couvre quatre catégories de véhicules : voitures, bus, fourgonnettes et autres. De plus, il inclut quatre conditions météorologiques : ensoleillé, nocturne, nuageux et pluvieux, ainsi que des scènes avec une densité de véhicules et des taux d'occlusion élevés.

Machine Translated by Google



Figure 5. Scénarios représentatifs dans l'ensemble de données UA-DETRAC.

Dans les expériences de détection de véhicules, les images sans étiquettes ont d'abord été exclues, ce qui a donné lieu à un ensemble d'apprentissage de 82 085 images et à un ensemble de test de 56 167 images. Pour éviter le surajustement, une image sur dix a été échantillonnée, obtenant finalement 8 209 images pour l'entraînement et 5 617 images pour l'évaluation. Pour les expériences de suivi des véhicules, 40 séquences vidéo de l' ensemble de test ont été utilisées pour l'évaluation.

Le périphérique GPU utilisé dans ces expériences est un NVIDIA GeForce RTX 4090 (NVIDIA Corporation, Santa Clara, Californie, États-Unis) et le périphérique CPU est un processeur Core i9-9900K à 3,60 GHz (Intel Corporation, Chengdu, Chine). Les expériences ont été menées sur un système Windows 10 avec un environnement d'apprentissage en profondeur basé sur PyTorch 1.31.1, CUDA 11.6 et Python 3.8. Les paramètres d'entraînement ont été définis comme suit : le nombre d'époques d'entraînement était de 200, la taille du lot était de 32 et aucun poids pré-entraîné n'a été utilisé pendant le processus d'entraînement.

4.2. Paramètres d'évaluation

Dans la détection de véhicules, Precision (P), Recall (R), mAP@0.5 et mAP@0.5:0.95 sont utilisés pour évaluer les résultats expérimentaux.

P : la proportion d'échantillons vraiment positifs parmi tous les échantillons détectés comme positifs, comme le montre l'équation (11) :

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{11}$$

R : la proportion d'échantillons positifs correctement détectés parmi tous les échantillons positifs réels, comme le montre l'équation (12) :

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{12}$$

où TP est le nombre d'échantillons vraiment positifs, FP est le nombre d'échantillons faussement positifs et FN est le nombre d'échantillons réellement positifs qui ont été détectés à tort comme des échantillons négatifs.

Précision moyenne (AP) : l'aire sous la courbe PR pour une certaine classe d'échantillons, comme le montre l'équation (13) :

$$PA = \int_0^1 PDR \tag{13}$$

mAP@0,5 est la précision moyenne moyenne pour toutes les classes avec un seuil IoU de 0,5.

mAP@0,5 : 0,95 est la précision moyenne moyenne pour toutes les classes avec des seuils IoU allant de de 0,5 à 0,95 avec un pas de 0,05.

Dans le suivi des véhicules, MOTA, IDF1 et IDS sont utilisés pour évaluer les résultats expérimentaux.

MOTA mesure la précision de l'algorithme de suivi, en tenant compte de diverses erreurs qui se produisent au cours du processus de suivi, telles que les faux positifs, les détections manquées et les changements d'identité. Ceci est illustré dans l'équation (14) :

Machine Translated by Google

$$MOTA = 1 - \frac{\sum t (FNt + FPt + IDSWt)}{\sum je\ GTt} \quad (14)$$

où FNt représente le nombre de détections manquées à l'instant t, FPt représente le nombre de faux positifs au temps t, IDSWt représente le nombre de changements d'identité au temps t, et GTt représente le nombre de cibles de vérité terrain à l'instant t.

IDF1 : IDF1 mesure la cohérence de l'identité et la continuité de l'algorithme de suivi, comme le montre l'équation (15) :

$$FIL1 = 2 \cdot \frac{PDI \cdot IDR}{IDP + IDR} \quad (15)$$

où IDP représente la proportion de cibles correctement identifiées parmi les cibles détectées cibles. L'IDR représente la proportion d'identités cibles correctement détectées par rapport à l'identité réelle. identités cibles.

IDS : nombre de changements d'identité qui se produisent pendant le processus de suivi, c'est-à-dire la même cible se voit attribuer des identités différentes. Une valeur inférieure indique de meilleures performances du tracker dans le maintien de la cohérence de l'identité.

4.3. Expériences d'ablation par détecteur

Vérifier l'efficacité des modules d'amélioration proposés en détection de véhicules, des expériences d'ablation ont été menées en utilisant YOLOv8-S comme modèle de base. Les résultats sont présentés dans le tableau 1 :

Tableau 1. Résultats de l'expérience d'ablation sur l'ensemble de données UA-DETRAC.

Modèle	P.	R.	mAP@0,5	mAP@0,5:0,95	Des flops
YOLOv8-S	71,8%	58,6%	64,2%	46,6%	28,8 Go
YOLOv8-S+CG_Down	78,4%	63,3%	69,9%	51,0%	30,7G
YOLOv8-S+C2f_DRB	81,5%	62,6%	71,4%	51,6%	24,7 Go
YOLOv8-S+CG_Down+C2f_DRB	80,7%	63,9%	72,9%	52,2%	26,6G
YOLOv8-S+CG_Down+C2f_DRB+Soft-NMS	82,4%	62,3%	73,2%	55,4%	26,6G

Comme le montrent les données du tableau 1, l'introduction du module CG dans le processus de sous-échantillonnage a augmenté P de 6,6 %, R de 4,7 %, mAP@0,5 de 5,7 % et mAP@0,5 : 0,95. de 4,4%, vérifiant l'efficacité du module CG dans l'extraction des caractéristiques du véhicule. Le l'introduction du module C2f_DRB a augmenté P de 9,7 %, R de 4,0 %, mAP@0,5 de 7,2 %, et mAP@0.5:0.95 de 5 %, démontrant l'avantage significatif de C2f_DRB dans la gestion des enjeux multi-échelles. Lorsque les modules CG et C2f_DRB ont été introduits simultanément, P a augmenté de 8,9 %, R de 5,3 %, mAP@0,5 de 8,7 % et mAP@0,5 : 0,95 de 5,6 %, prouvant que la combinaison de ces deux modules permet de mieux extraire et intégrer le véhicule caractéristiques. Enfin, remplacer légèrement le NMS traditionnel par Soft-NMS pour un post-traitement a augmenté mAP@0,5 de 0,3 point de pourcentage, mais a considérablement amélioré mAP@0,5:0,95 de 3,2 %, jetant les bases d'un suivi plus précis des véhicules dans les étapes ultérieures. Par rapport au modèle de base, avec une réduction de 2,2 G des Flops, P a augmenté de 10,6 %, R de 3,7 %, mAP@0,5 de 9 % et mAP@0,5 : 0,95 de 8,8 %, vérifiant pleinement la supériorité de CDS-YOLOv8 dans la gestion des scénarios de détection de véhicules.

Pour démontrer davantage les progrès du modèle amélioré en matière de détection de véhicules, une analyse visuelle des résultats expérimentaux est présentée, comme le montre la figure 6. Le les images de gauche à droite représentent l'image originale, les résultats de prédiction de la ligne de base modèle YOLOv8-S, les résultats de prédiction du modèle amélioré CDS-YOLOv8 et le ajustements effectués par CDS-YOLOv8 par rapport à YOLOv8-S, qui incluent la réduction dans les véhicules manqués. Les parties optimisées sont marquées de cercles roses. De plus, le les zones noires dans les images sont des régions ignorées, car le suivi ultérieur du véhicule n'est effectué que se concentre sur le déplacement des véhicules sur la route principale.

Machine Translated by Google



Figure 6. Visualisation des résultats de détection.

Dans la figure 6, nous avons sélectionné trois scénarios représentatifs : ensoleillé, nocturne et pluvieux. Dans Dans le scénario ensoleillé, comme indiqué dans la zone entourée de rose, CDS-YOLOv8 a détecté un bus qui YOLOv8 a manqué, ainsi que les voitures plus éloignées de la caméra. Dans le scénario nocturne, CDS-YOLOv8 a détecté presque toutes les cibles manquées par YOLOv8 et a identifié avec précision un voiture blanche partiellement obstruée que YOLOv8 n'a pas reconnue comme cible valide. Sous la pluie scénario, CDS-YOLOv8 a détecté presque toutes les petites cibles éloignées de la caméra et a identifié un taxi partiellement obstrué et non reconnu comme cible valide par YOLOv8.

Dans ces scénarios, CDS-YOLOv8 a démontré des améliorations significatives par rapport à YOLOv8-S en capacités d'extraction de fonctionnalités et de traitement multi-échelle. De plus, il a conservé plus des cibles valides dans des scènes de véhicules denses en gérant les cases candidates qui se chevauchent fortement à l'aide Les Soft-NMS avec confiance diminuent plutôt que de simplement les éliminer via un seuil IoU . En résumé, CDS-YOLOv8 a obtenu d'excellentes performances sous divers éclairages et conditions météorologiques, gérant efficacement les problèmes multi-échelles et les scénarios de véhicules denses.

4.4. Expérience de comparaison des détecteurs

Pour démontrer l'avancement de CDS-YOLOv8 dans la détection de véhicules, nous avons comparé avec des algorithmes de détection traditionnels. Les résultats sont présentés dans le tableau 2 :

Tableau 2. Résultats expérimentaux comparatifs sur l'ensemble de données UA-DETRAC. (Les meilleurs résultats sont souligné en gras.)

Modèle	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Des flops
Plus rapide-RCNN [20]	66,3%	38,8%	60,5G
Cascade-RCNN [21]	65,2%	41,1%	88,1 G
RétineNet [19]	56,6%	32,1%	45,2G
ATSS [35]	58,8%	32,1%	49,2 G
YOLOv5-S [36]	62,0%	44,9%	16G
YOLOv6-S [37]	59,0%	43,0%	44,9 Go
YOLOv7 [38]	71,1%	53,9%	105,2 Go
YOLOv8-S [13]	64,2%	46,6%	28,8 Go
YOLOv8-M [13]	68,2%	50,6%	79,3 G
YOLOv8-L [13]	71,6%	51,4%	165,7 Go
YOLOv9-S [39]	65,1%	48,0%	39,6 G
L. Kang et coll. [23]	70,0%	50,3%	26,7G
CDS-YOLOv8 (le nôtre)	73,2%	55,4%	26,6G

D'après les résultats de la comparaison, il est évident que CDS-YOLOv8 présente le système le plus avancé. performances par rapport à ces méthodes de détection traditionnelles à deux et à une étape. C'est

Machine Translated by Google

les performances dépassent non seulement la dernière version de YOLOv9-S, mais surpassent également les grandes version de YOLOv8, réalisant des améliorations de 1,6% et 4% dans mAP@0.5 et mAP@0.5:0.95, respectivement. CDS-YOLOv8 établit un meilleur équilibre entre précision et calcul complexité, prouvant ainsi sa supériorité dans les scénarios de détection de véhicules.

4.5. Expérience d'ablation de suivi

Vérifier l'efficacité du détecteur amélioré et l'amélioration proposée modules de suivi des véhicules, une expérience d'ablation a été menée comme indiqué dans le tableau 3. Les résultats expérimentaux sont les moyennes basées sur 40 séquences de tests :

Tableau 3. Résultats de l'expérience d'ablation sur l'ensemble de données UA-DETRAC.

Détecteur+Traqueur	milDF1	ID	mMOTA
YOLOv8s+ BYTETrack	76,9%	855	67,2%
CDS-YOLOv8+ BYTETrack	78,2%	785	70,6%
CDS-YOLOv8+ BYTETrack+ KF amélioré	79,7%	717	73,1%
CDS-YOLOv8+ BYTETrack+ KF +GSI amélioré	80,3%	530	73,9%

Par rapport au détecteur d'origine, l'introduction du détecteur amélioré CDS- YOLOv8 augmente le mIDF1 de 1,3 %, réduit l'IDS de 70 et améliore considérablement le mMOTA. de 3,4%. Cela reflète le rôle critique du détecteur dans le système de suivi. Ensuite, après avoir amélioré le tracker en optimisant le filtre de Kalman, mIDF1 augmente de 1,5%, IDS diminue de 68 et mMOTA s'améliore de 2,5%. Cela indique que le Kalman amélioré Le filtre peut gérer de manière plus flexible le mouvement non linéaire des véhicules. Sur cette base, en introduisant GSI pour traiter les trajectoires de suivi augmente encore mIDF1 de 0,6 %, de manière significative réduit l'IDS de 187 et améliore le mMOTA de 0,8 %, démontrant l'efficacité de cette méthode pour combler les écarts de trajectoire. Utilisation du détecteur et du tracker améliorés, comparé par rapport à avant les améliorations, mIDF1 augmente de 3,4 %, IDS diminue de 325 et mMOTA s'améliore de 6,7 %, améliorant considérablement les performances de suivi des véhicules.

Pour démontrer de manière plus intuitive l'efficacité du détecteur et du tracker améliorés dans le suivi des véhicules, une analyse de visualisation des résultats du suivi a été effectuée, comme indiqué dans la figure 7. Les quatre colonnes d'images de gauche à droite sont l'image originale, le suivi Résultats en utilisant le détecteur et le tracker d'origine, les résultats de suivi en utilisant le système amélioré détecteur et traqueur, et les effets d'optimisation du modèle amélioré par rapport au détecteur et tracker d'origine.



Figure 7. Visualisation des résultats du suivi.

Dans la figure 7, nous avons également sélectionné trois scénarios représentatifs : ensoleillé, nocturne et pluvieux. Dans le scénario ensoleillé, comme le montre la zone entourée de rose, CDS-YOLOv8—par rapport à YOLOv8 : non seulement il a détecté davantage de cibles manquées, mais il a également fourni des limites plus précises. détection de boîte. Par exemple, CDS-YOLOv8 a pu identifier de manière plus complète un une camionnette blanche et un taxi au bord de l'image, alors que YOLOv8 n'a identifié qu'une partie

Machine Translated by Google

région comme cadre de délimitation. De plus, l'identifiant de suivi de la camionnette blanche était 1281 avec le détecteur et le tracker d'origine, mais il a considérablement chuté à 1099 après des améliorations, indiquant une amélioration notable de la cohérence du suivi. Dans le scénario nocturne, le Un détecteur amélioré a identifié davantage de petites cibles et l'ID de suivi du bus sur le gauche a diminué de manière significative, passant de 3060 à 2529. Dans le scénario pluvieux, YOLOv8 a identifié l'avant d'une voiture de police en tant que véhicule distinct, tandis que CDS-YOLOv8 a correctement reconnu toute la boîte englobante de la voiture de police. De plus, l'identifiant de suivi de la voiture de police a considérablement diminué, passant de 5 898 à 5 026 après les améliorations.

Dans l'ensemble, le détecteur amélioré a non seulement réduit le nombre de détections manquées mais a également fourni des détections de boîtes englobantes plus précises. La réduction significative de l'ID les chiffres pour la même cible indiquent que le tracker amélioré a maintenu une grande précision et la cohérence dans le suivi des véhicules. Le détecteur et le tracker améliorés sont mieux équipés pour gérer des scénarios complexes et des changements non linéaires dans les véhicules en milieu urbain.

4.6. Expériences de comparaison de trackers

Pour valider les progrès du tracker amélioré, des expériences comparatives ont été mené avec des algorithmes traditionnels de suivi d'objets en deux étapes. Pour garantir l'équité, tous les expériences ont utilisé CDS-YOLOv8 pour le détecteur. Les résultats du suivi sont présentés dans le tableau 4 :

Tableau 4. Résultats de comparaison sur l'ensemble de données UA-DETRAC. (Les meilleurs résultats sont mis en évidence en gras.)

Traqueur	milDF1	ID	mMOTA
TRI profond [29]	73,5%	2731	70,0%
Tri fort [17]	76,8%	2994	71,3%
TRI OCS [40]	76,8%	2191	71,9%
DeepOCSORT [41]	77,1%	1830	72,1%
BYTETrack [16]	78,2%	785	70,6%
TRI-BOT [30]	78,6%	727	72,9%
BYTETrack amélioré (le nôtre)	80,3%	530	73,9%

D'après les résultats de la comparaison, on peut voir que le BYTETrack amélioré démontre performances de pointe. Analyser les résultats du suivi BYTETrack et BOT-SORT algorithmes, il est évident que la prise en compte des cases de score de confiance faible peut considérablement réduire l'IDS, prouvant son efficacité dans la cohérence des identités. De plus, DeepSORT, StrongSORT, DeepOCSORT et BOT-SORT utilisent tous la méthode ReID, qui réduit la vitesse de fonctionnement du réseau. En revanche, le BYTETrack amélioré présenté dans cet article n'utilise pas la méthode ReID et atteint néanmoins les performances les plus élevées dans l'ensemble les trois mesures de suivi, obtenant un bon équilibre entre vitesse de suivi et précision.

5. Conclusions

Cet article aborde les défis rencontrés dans la détection et le suivi des véhicules, tels que des scénarios complexes, la diversité d'échelle causée par les différentes tailles de véhicules et de caméras angles et occultations partielles dans les scènes denses. Une série d'améliorations ont été proposées pour s'attaquer à ces problèmes.

En termes de détection de véhicules, nous introduisons le module CG lors du sous-échantillonnage processus, qui combine les caractéristiques locales et environnantes pour former des caractéristiques communes. Ces les caractéristiques communes sont ensuite pondérées à l'aide d'informations globales, améliorant ainsi l'extraction des caractéristiques capacité du détecteur. De plus, le module DRB a été reconstruit et intégré dans le module C2f. Utilisation de couches de convolution à grand noyau et de plusieurs petits noyaux des circonvolutions avec des dilatations, différentes échelles et des caractéristiques clairsemées ont été extraites. La technologie de reparamétrage a été utilisée pour générer des noyaux de convolution équivalents, permettant pour une extraction plus complète des caractéristiques pendant la phase d'inférence, résolvant ainsi efficacement les problèmes multi-échelles. Nous avons également remplacé le NMS traditionnel par Soft-NMS, qui gère mieux les scénarios d'occlusion partielle grâce à une diminution douce de la confiance. Dans l'aspect de suivi des véhicules, nous avons amélioré le vecteur d'état du filtre de Kalman et introduit

Machine Translated by Google

une matrice de covariance liée au temps pour mieux gérer les mouvements dynamiques des véhicules. De plus, la méthode GSI a été intégrée pour combler les lacunes de trajectoire causées par des détections manquées. Nous avons mené des expériences sur l'ensemble de données UA-DETRAC, en utilisant des études d'ablation pour démontrer le rôle de chaque module et en utilisant une analyse visuelle pour montrer intuitivement les effets d'optimisation du modèle amélioré. Des expériences comparatives ont montré les performances avancées du CDS-YOLOv8 et de l'algorithme BYTETrack amélioré.

À l'avenir, nous nous concentrerons davantage sur la détection et le suivi des véhicules sous différents angles, tout en explorant des modalités plus diverses, telles que les images infrarouges, le radar et d'autres méthodes, pour améliorer l'efficacité de la détection et du suivi des véhicules.

Contributions de l'auteur : Conceptualisation, LY ; méthodologie, LY; logiciel, LY; validation, LY et YC ; analyse formelle, CS ; enquête, CS et RL ; curation de données, LY et CX ; rédaction – révision et édition, LY ; visualisation, LY ; supervision, YC; Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par le projet Talent Fund de la China West Normal University (n° 463177).

Déclaration de disponibilité des données : les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l' article ; des demandes complémentaires peuvent être adressées au premier auteur.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Boukerche, A. ; Tao, Y. ; Sun, P. Méthodes de prévision du flux de trafic automobile basées sur l'intelligence artificielle pour prendre en charge les systèmes de transport. Calculer. Réseau. 2020, 182, 107484. [Réf. croisée]
2. Ju, Y. ; Cao, Z. ; Chen, Y. ; Liu, L. ; Pei, Q. ; Mumtaz, S. ; Dong, M. ; Guizani, M. Déchargement sécurisé assisté par NOMA pour les réseaux informatiques de périphérie de véhicules avec apprentissage asynchrone par renforcement profond. IEEETrans. Intell. Transp. Système. 2024, 25, 2627-2640. [Référence croisée]
3. Roy, D. ; Li, Y. ; Jian, T. ; Tian, P. ; Chowdhury, K. ; Ioannidis, S. Détection multimodalité et fusion de données pour la détection multi-véhicules. IEEETrans. Multimed. 2023, 25, 2280-2295. [Référence croisée]
4. Humayun, M. ; Ashfaq, F. ; Jhanjhi, Nouvelle-Zélande ; Alsadun, MK Gestion du trafic : Détection de véhicules à plusieurs échelles dans des conditions météorologiques variables Conditions utilisant YOLOv4 et le réseau de pooling pyramidal spatial. Électronique 2022, 11, 2748. [CrossRef]
5. Deshmukh, P. ; Satyanarayana, GSR ; Majhi, S. ; Sahoo, Royaume-Uni ; Das, SK Détection de véhicule basée sur un transformateur Swin dans Indiscipliné Environnement de circulation. Système expert. Appl. 2023, 213, 118992. [Réf. croisée]
6. Wang, J. ; Dong, Y. ; Zhao, S. ; Zhang, Z. Une méthode de détection et de suivi des véhicules de haute précision basée sur le mécanisme d'attention. Capteurs 2023, 23, 724. [CrossRef] [Pub Med]
7. Bui, T. ; Wang, G. ; Wei, G. ; Zeng, Q. Algorithme de détection et de suivi multi-objets de véhicules basé sur la version améliorée You Only Look Once 5s et DeepSORT. Appl. Sci. 2024, 14, 2690. [Réf. croisée]
8. Wu, Y. ; Wang, T. ; Gu, R. ; Liu, C. ; Xu, B. Algorithme de détection de véhicules nocturnes basé sur la technologie de traduction d'images 1. J. Intell. Système flou. 2024, 46, 5377-5389. [Référence croisée]
9. Xu, B. ; Liu, X. ; Feng, G. ; Liu, C. Un cadre monoculaire pour une identification précise de la distribution spatio-temporelle de Charges sur les roues des véhicules dans des scénarios d'occlusion. Ing. Appl. Artif. Intell. 2024, 133, 107972. [Réf. croisée]
10. Xu, B. ; Liu, C. Méthode intégrée basée sur la détection de points clés et un modèle d'apprentissage multi-profond pour identifier la charge par essieu du véhicule Distribution spatio-temporelle. Av. Ing. Informer. 2024, 62, 102688. [Réf. croisée]
11. Xu, H. ; Lai, S. ; Li, X. ; Yang, Y. Modèle de détection de voiture inter-domaines avec mécanisme d'attention de bloc convolutif intégré. Image Vis. Calculer. 2023, 140, 104834. [Réf. croisée]
12. Zhang, C. ; Yang, C. ; Wu, D. ; Dong, H. ; Deng, B. Ré-identification du véhicule Cross-View basée sur la correspondance graphique. Appl. Intell. 2022, 52, 14799-14810. [Référence croisée]
13. Ultralytiques. YOLOv8 : Détection d'objets en temps réel et segmentation d'images. Dépôt GitHub. Disponible en ligne : https ://github.com/ultralytics/ultralytics (consulté le 28 juillet 2024).
14. Wu, T. ; Tang, S. ; Zhang, R. ; Cao, J. ; Zhang, Y. CGNet : Un réseau guidé par le contexte léger pour la segmentation sémantique. IEEETrans. Processus d'images. 2021, 30, 1169-1179. [Référence croisée] [Pub Med]
15. Ding, X. ; Zhang, Y. ; Ge, Y. ; Zhao, S. ; Chanson, L. ; Yue, X. ; Shan, Y. UniRepLKNet : Un ConvNet à grand noyau de perception universelle pour l'audio, la vidéo, les nuages de points, les séries chronologiques et la reconnaissance d'images. arXiv 2024, arXiv :2311.15599.
16. Zhang, Y. ; Soleil, P. ; Jiang, Y. ; Yu, D. ; Weng, F. ; Yuan, Z. ; Luo, P. ; Liu, W. ; Wang, X. ByteTrack : suivi multi-objets en associant chaque boîte de détection. Dans Computer Vision—ECCV 2022, Actes de la 17e Conférence européenne, Tel Aviv, Israël, 23-27 octobre 2022 ; Avidan, S., Brostow, G., Cissé, M., Farinella, GM, Hassner, T., Eds.; Springer Nature Suisse : Cham, Suisse, 2022 ; p. 1 à 21.

Machine Translated by Google

17. Du, Y. ; Zhao, Z. ; Chanson, Y. ; Zhao, Y. ; Su, F. ; Gong, T. ; Meng, H. StrongSORT : rendez DeepSORT à nouveau génial. IEEETrans. Multimed. 2023, 25, 8725-8737. [Référence croisée]
18. Liu, W. ; Anguélov, D. ; Erhan, D. ; Szegedy, C. ; Reed, S. ; Fu, CY ; Berg, AC SSD : Détecteur MultiBox à prise unique. Dans Computer Vision—ECCV 2016, Actes de la 14e Conférence européenne, Amsterdam, Pays-Bas, 11-14 octobre 2016 ; Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M., éd.; Springer International Publishing : Cham, Suisse, 2016 ; pp. 21-37.
19. Lin, TY ; Goyal, P. ; Girshick, R. ; Lui, K. ; Dollar, P. Perte focale pour la détection d'objets denses. Dans les actes de l'IEEE International Conférence sur la vision par ordinateur (ICCV), Venise, Italie, 22-29 octobre 2017 ; pp. 2980-2988.
20. Girshick, R. Fast R-CNN. Dans Actes de la Conférence internationale de l'IEEE sur la vision par ordinateur (ICCV), Santiago, Chili, 7-13 décembre 2015 ; pages 1440 à 1448.
21. Cai, Z. ; Vasconcelos, N. Cascade R-CNN : Plongée dans la détection d'objets de haute qualité. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes (CVPR), Salt Lake City, UT, États-Unis, 18-23 juin 2018 ; pages 6154 à 6162.
22. Chen, Z. ; Guo, H. ; Yang, J. ; Jiao, H. ; Feng, Z. ; Chen, L. ; Gao, T. Algorithme de détection rapide des véhicules dans une scène de trafic basé sur un SSD amélioré. Mesure 2022, 201, 111655. [CrossRef]
23. Kang, L. ; Lu, Z. ; Meng, L. ; Gao, Z. YOLO-FA : Détecteur YOLO basé sur l'attention floue de type 1 pour la détection de véhicules. Système expert. Appl. 2024, 237, 121209. [Référence croisée]
24. Bié, M. ; Liu, Y. ; Li, G. ; Hong, J. ; Li, J. Algorithme de détection de véhicules en temps réel basé sur un outil léger à regarder une seule fois (YOLOv5n-L) Approche. Système expert. Appl. 2023, 213, 119108. [Réf. croisée]
25. Wang, B. ; Li, Y.-Y. ; Xu, W. ; Wang, H. ; Hu, L. Méthode de détection des véhicules et des piétons basée sur YOLOv8 amélioré. Electronique 2024, 13, 2149. [Réf. croisée]
26. Wang, Z. ; Zheng, L. ; Liu, Y. ; Li, Y. ; Wang, S. Vers un suivi multi-objets en temps réel. Dans Computer Vision—ECCV 2020, Actes de la 16e Conférence européenne, Glasgow, Royaume-Uni, 23-28 août 2020 ; Vedaldi, A., Bischof, H., Brox, T., Frahm, J.-M., éd.; Springer International Publishing : Cham, Suisse, 2020 ; pp. 107-122.
27. Zhang, Y. ; Wang, C. ; Wang, X. ; Zeng, W. ; Liu, W. FairMOT : Sur l'équité de la détection et de la réidentification dans le suivi d'objets multiples. Int. J. Informatique. Vis. 2021, 129, 3069-3087. [Référence croisée]
28. Bewley, A. ; Ge, Z. ; Ott, L. ; Ramos, F. ; Upcroft, B. Suivi simple en ligne et en temps réel. Dans Actes de la Conférence internationale IEEE 2016 sur le traitement d'images (ICIP), Phoenix, AZ, États-Unis, 25-28 septembre 2016 ; pp. 3464-3468.
29. Wojke, N. ; Bewley, A. ; Paulus, D. Suivi simple en ligne et en temps réel avec une métrique d'association profonde. Dans les actes du Conférence internationale IEEE 2017 sur le traitement d'images (ICIP), Pékin, Chine, 17-20 septembre 2017 ; pages 3645 à 3649.
30. Aharon, N. ; Orfaig, R. ; Bobrovsky, B.-Z. BoT-SORT : Associations robustes de suivi multi-piétons. arXiv 2022, arXiv :2206.14651.
31. Zhao, Z. ; Ji, Z. ; Yao, Y. ; Lui, Z. ; Du, C. Modèle de détection amélioré et stratégie de notation conjointe pour le suivi de plusieurs véhicules. IEEE Accès 2023, 11, 30807-30818. [Référence croisée]
32. Zhang, K. ; Wu, F. ; Soleil, H. ; Cai, M. Détection monoculaire de la vitesse des véhicules basée sur YOLOX et DeepSORT améliorés. Neural Calculer. Appl. 2024, 36, 9643-9660. [Référence croisée]
33. Han, G. ; Jin, Q. ; Rong, H. ; Jin, L. ; Zhang, L. Algorithme de suivi des véhicules basé sur l'apprentissage profond dans une perspective routière. Durabilité 2023, 15, 1950. [CrossRef]
34. Wen, L. ; Du, D. ; Cai, Z. ; Lei, Z. ; Chang, MC; Qi, H. ; Lim, J. ; Yang, MH ; Lyu, S. UA-DETRAC : une nouvelle référence et un nouveau protocole pour la détection et le suivi de plusieurs objets. Calculer. Vis. Image comprise. 2020, 193, 102907. [Réf. croisée]
35. Zhang, S. ; Élégant.; Yao, Y. ; Lei, Z. ; Li, SZ Combler le fossé entre la détection basée sur l'ancre et sans ancre via la sélection adaptative d'échantillons de formation. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes (CVPR), Seattle, WA, États-Unis, 13-19 juin 2020 ; pages 9759 à 9768.
36. Ultralytiques. YOLOv5 : famille d'architectures et de modèles de détection d'objets pré-entraînés sur l'ensemble de données COCO. Dépôt GitHub. Disponible en ligne : https://github.com/ultralytics/yolov5 (consulté le 28 juillet 2024).
37. Li, C. ; P'tit.; Jiang, H. ; Weng, K. ; Geng, Y. ; P'tit.; Ke, Z. ; Li, Q. ; Cheng, M. ; Nie, W. ; et coll. YOLOv6 : une détection d'objets en une seule étape Cadre pour les applications industrielles. arXiv 2022, arXiv :2209.02976.
38. Wang, C.-Y. ; Bochkovskiy, A. ; Liao, H.-YM YOLOv7 : un sac de cadeaux entraînables établit un nouvel état de l'art pour les détecteurs d'objets en temps réel. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes (CVPR), Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 17-24 juin 2023 ; pages 7464 à 7475.
39. Wang, C.-Y. ; Ouais, I.-H.; Liao, H.-YM YOLOv9 : Apprendre ce que vous voulez apprendre à l'aide d'informations de dégradé programmables. arXiv 2024, arXiv :2402.13616.
40. Cao, J. ; Pang, J. ; Weng, X. ; Khirodkar, R. ; Kitani, K. SORT centré sur l'observation : repenser le SORT pour un suivi multi-objets robuste. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes (CVPR), Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 17-24 juin 2023 ; pages 9686 à 9696.
41. Maggiolino, G. ; Ahmad, A. ; Cao, J. ; Kitani, K. Deep OC-Sort : suivi de plusieurs piétons par réidentification adaptative. Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2023 sur le traitement d'images (ICIP), Kuala Lumpur, Malaisie, 8-11 octobre 2023 ; pp. 3025-3029.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Evolution des paramètres de rayonnement de l'antenne pour Transition air-plasma

Tomasz Aleksander Mi´s

Division de physique des plasmas, Centre de recherche spatiale de l'Académie polonaise des sciences, ul. Bartycka 18A, 00-716 Warszawa, Pologne ; tmis@cbk.waw.pl ou tomasz.a.mis@mailplus.pl

Résumé : Cet article présente la description des paramètres de l'antenne liés à ses capacités de rayonnement/réception influencées par les paramètres du plasma dans l'environnement entourant l'antenne, complétant les travaux existants sur les paramètres de l'antenne (par exemple l'impédance ou les courants). Les paramètres considérés sont les rayons des zones de rayonnement (inductives, Fresnel, Fraunhofer), le festonnage et la directivité ; un procédé de transformation du schéma de rayonnement/réception mesuré dans l'air/vide en le schéma attendu pour des conditions plasmatiques données est également envisagé. Trois conditions de plasma simplifiées différentes sont prises en compte (différentes densités électroniques : 1,4 × 1012 m−3, 4 × 1011 m−3 et 108 m−3), avec différentes longueurs d'antenne (1 m, 10 m, 100 m) et propagation du signal. mode (classique-ionosphérique, siffleur et Alfvén). Les résultats montrent que les paramètres de l'antenne présentés et son diagramme de rayonnement/réception dépendent fortement des conditions du plasma. Ces résultats peuvent être utilisés pour formuler des exigences et des contraintes supplémentaires pour la conception mécanique de nouveaux instruments destinés aux mesures de météorologie spatiale à bord des engins spatiaux (par exemple, éloigner les antennes de l'engin spatial afin de ne pas modifier leurs diagrammes de rayonnement/réception ou de ne pas mesurer les plasma autour de l'engin spatial) ou un traitement plus précis des données des satellites de météorologie spatiale existants, permettant par exemple une triangulation plus précise de la source du signal ou de sa puissance spectrale concernant les performances réelles des antennes immergées dans le plasma.

Mots-clés : plasma; plasmasphère; magnétosphère; antenne spatiale; antenne active; paramètres d'antenne ; Motif de radiation; tests d'antennes; directivité; festonnage

check for updates

Citation : Mi´s, TA Évolution de Paramètres de rayonnement d'antenne pour Transition air-plasma. Électronique 2024, 13, 3040. https://doi.org/10.3390/électronique13153040

Rédacteurs académiques : Jun Wang, Fan de Kuikui, Jianfeng Zhu et Fan Wu

Reçu : 27 juin 2024
Révisé : 23 juillet 2024
Accepté : 26 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Droit d'auteur : © 2024 par l'auteur. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction; Émissions électromagnétiques et antennes dans les plasmas

Depuis le début de l'ère spatiale et l'exploration de l'environnement proche de la Terre, un grand intérêt a été porté à l'étude des propriétés de la gaine de particules ionisées qui entoure la planète - la plasmasphère, sa variabilité en fonction des conditions solaires, sa influence sur la propagation des signaux radio et effet qu'ils ont ou peuvent avoir sur les engins spatiaux et les missions spatiales habitées [1]. Depuis les années 1960, de nombreux phénomènes radio naturels ont été identifiés comme étant produits par les interactions entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre (par exemple, le rayonnement kilométrique auroral [2-4] et d'autres types d'émissions [5]), dont beaucoup qui sont générés dans le guide d'ondes terrestre (l'espace entre la surface de la Terre et les couches inférieures de l'ionosphère) et sont capables de se propager plus loin dans l'ionosphère, soit le long des lignes de champ magnétique, soit indépendamment d'elles [6-8]. Ces émissions varient considérablement en fonction de leurs chemins de propagation [9] et présentent une capacité utile à être utilisées comme outil de télédétection pour l'ionosphère [10] et la plasmasphère [8], y compris la magnétopause et le choc d'arc plasmasphérique [11]. La propagation de ces signaux dépend fortement des conditions plasmatiques locales, tant dans l'ionosphère que dans la plasmasphère, qui ont été étudiées, par exemple lors de l'apparition des éruptions solaires à rayons X, affectant de manière significative les deux environnements ionisés [12-15]. . Il convient de noter que les changements complexes dans les paramètres du milieu ionisé (qui incluent non seulement la densité électronique, mais également la densité protonique) sont également cruciaux pour l'analyse des environnements quasi planétaires des planètes exposées à un rayonnement solaire encore plus intense. influences, par exemple Mercure [16].

Machine Translated by Google

Comme bon nombre de ces émissions naturelles peuvent être captées assez facilement au sol [6] et à des altitudes plus proches de l'ionosphère [4,17], leur propagation à travers l' environnement magnétosphérique nécessite souvent des mesures in situ (parfois in situ uniquement [8]), réalisé par des vaisseaux spatiaux et des instruments dédiés - par exemple, Interball-1 [18], POLRAD à bord d' Interball-2 [2], DEMETER [7], SWARM [3], PROGNOZ-8 [19], MAGION-4 [20] , ISEE 1 et 2 [5], CESAR [21], CORONAS [21], CLUSTER [22] ou Arase [23]. Afin de maximiser l'ouverture effective de l'antenne pour la réception et, dans certains cas, les expériences actives, les antennes spatiales sont généralement conçues sous forme de grands dipôles (jusqu'à des dizaines de mètres de longueur totale), en treillis ou en forme de fil, avec un support optionnel pour d'autres capteurs plus petits, par exemple les magnétomètres [23,24] ou les sondes de Langmuir [25]. Bien que pratiques pour les calculs et les tests dans un environnement air/vide, les dipôles présentent cependant des paramètres et des performances significativement différents lorsqu'ils sont immergés dans un environnement ionisé. Des travaux approfondis ont été menés pour déterminer les paramètres de charge de telles antennes, en ce qui concerne l'angle de l'intensité du champ magnétique local [26-28] ou le modèle/les modes de courant dans les fils d'antenne en fonction des paramètres locaux du plasma [29,30]. Pour les antennes actives/émettrices, un élément crucial est de déterminer la taille de la gaine plasmatique qui entoure le radiateur et participe à la formation de l'onde radio [31], ainsi que de déterminer les formules du champ électrique et magnétique. intensités dans l'espace tridimensionnel (crucial pour le maintien de la précision [32]) autour de l'antenne, toutes deux approchées pour le plasma anisotrope [33], y compris la distribution spatiale des paramètres du plasma [34] et différents types d'émissions radio en fonctio

Ces analyses montrent clairement les différences significatives entre les cas air/vide et plasma pour la conception de l'antenne et les paramètres de base de l'antenne, tels que l' impédance et la réactance d'entrée ou le diagramme de rayonnement. Pourtant, peu d'informations sont consacrées aux performances réelles du rayonnement spatial. de l'antenne, par exemple comment le diagramme de rayonnement se forme et évolue dans différentes conditions plasmatiques (ceci est crucial pour déterminer, par exemple, la direction d'arrivée du signal enregistré). Ces différences sont importantes tant au niveau de la conception de l'antenne que de son fonctionnement, qui vise à fournir des données scientifiquement utiles décrivant de la manière la plus précise possible les phénomènes apparaissant à l'intérieur de la plasmasphère. Bien que des formulations plus élaborées et plus précises pour différents types de plasmas puissent être incluses lors de la phase de conception de l'antenne, la vérification et le test des paramètres (par exemple, le diagramme de rayonnement) peuvent être effectués en pratique uniquement dans des conditions atmosphériques, ce qui nécessite une procédure simple. méthode de transformation des résultats dans l'air en résultats plasmatiques. De plus, à mesure que le plasma évolue autour de l'antenne spatiale , l'antenne change constamment son diagramme de rayonnement et ses caractéristiques (festonnage, directivité, zones de rayonnement), à la fois dans le domaine des variables du plasma et dans le domaine des fréquences de fonctionnement. L'évaluation de ces changements, même sous une forme simplifiée mais facilement réalisable, est cruciale pour l'analyse des spectrogrammes reçus (par exemple, pour déterminer l'angle d'arrivée des signaux enregistrés ou la sensibilité du système d'antenne dans les conditions plasmatiques données dans la gamme de fréquence donnée), ainsi que l'évaluation de l'influence potentielle des objets extérieurs - perches, structures satellitaires, autres antennes à proximité - sur le plasma auquel l'antenne est soumise (incluant notamment la gaine plasmatique [31]).

Prenant toutes les considérations ci-dessus, cet article présente un résumé simplifié (pour un environnement isotrope, le nombre d'onde en tant que variable unidimensionnelle et les conditions du champ magnétique données plus en détail) des méthodes analytiques pour la détermination des paramètres d'antenne attendus : diagramme de rayonnement, festonnage, directivité et sensibilité spectrale. —pour les conditions plasmatiques et géométriques données, permettant de mieux évaluer le cas de fonctionnement d'une antenne à l'intérieur d'un plasma, facilitant l'évaluation de l'antenne lors des tests et offrant une augmentation de la précision dans l'analyse des spectrogrammes enregistrés (également des spectrogrammes des missions spatiales mentionnées ci-dessus) — comblant efficacement le fossé entre les analyses d'antennes existantes (par exemple, les diagrammes d'impédance et de courant) et leurs performances réelles dans l'espace environnant.

Machine Translated by Google

2. Evolution des zones de rayonnement

Les zones de rayonnement autour de l'antenne peuvent être décrites comme les plages dans lesquelles l' énergie rayonnée par l'antenne est initialement (près de la surface de l'antenne) stockée dans l' espace libre sous une forme réactive, puis, à mesure que l'on s'éloigne de l'antenne, la le front d'onde radio est formé avec ses composants de base de champ électrique et magnétique ; l'énergie prend la forme radiative [36]. La figure 1 montre le schéma de base des zones autour d'un dipôle symétrique, indiquant le rayon de la zone de Fresnel rFresnel, derrière lequel la forme réactive ou l'énergie émise est dominante, et le rayon de la zone Fraunhofer rFraunhofer, après quoi le front d'onde radio est complètement façonné. De plus, pour une dimension physique d'antenne h inférieure à la longueur d'onde λ , la zone limitée par la longueur d'onde (réputée réactive) est également indiquée [37].

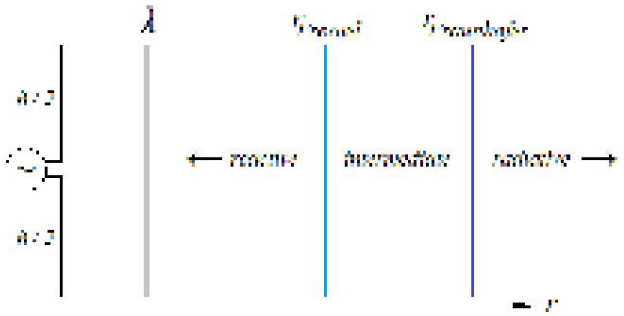


Figure 1. Schéma des zones de rayonnement autour d'un dipôle symétrique.

Les rayons de zone suivants pour le i-ème λ peuvent être définis comme [37] :

$$rFresnel_i = \sqrt{\frac{h}{2\lambda_i}} \quad (1)$$

$$rFraunhofer = \frac{2h^2}{\lambda_i} \quad (2)$$

Pour les formulations mathématiques précises des composantes du champ électrique et magnétique dans les directions d'élévation θ, d'orientation φ et radiale r à partir de l'antenne, la limite θ distance qui sépare les zones réactives et radiatives rFraunhofer_approx. peut être défini comme [38] :

$$rFraunhofer_approx. = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m_e \varepsilon_0 c^2}} \quad (3)$$

où λ 0 [m] est la longueur d'onde de l'espace libre, e est la charge électrique des électrons (1,602 × 10−19 C), ne [1/m3] est la concentration/densité des électrons, me est la masse des électrons (9,109 × 10−31 kg), ε0 est la permittivité électrique en espace libre (8,854 × 10−12 F/m) et c est la vitesse de la lumière en espace libre (300 000 000 m/s). Pour cette formulation, la zone proche de rayonnement (réactif) est située à des distances r << rFraunhofer_approx.; pour la zone intermédiaire : r ~ rFraunhofer_approx. et pour la zone radiative : r >> rFraunhofer_approx..

Le i-ième λ peut être calculé comme suit :

$$\lambda_i = \frac{2\pi}{k_i} \quad (4)$$

où ki désigne le nombre d'onde pour un mode de propagation spécifique donné. Dans cet article, trois modes de propagation de base pour les basses fréquences sont considérés : le mode siffleur (kW), c'est-à-dire pour les fréquences inférieures à la fréquence locale du plasma électronique, approchée à 1400,564 kHz [35], le mode Alfvén (kA), c'est-à-dire pour les fréquences inférieures à la fréquence gyromagnétique locale des ions, approchée à 40,215 Hz [35], et le nombre d'onde kJ calculé pour les conditions de propagation déterminées par la fréquence de coupure ionosphérique (notée par l'indice « classique ») pour les petites antennes à éléments de courant [38] .

Machine Translated by Google

Pour le mode siffleur, tel que donné par Bannister et al. [35], le nombre d'onde est égal à

$$1\ kW = \frac{}{c} \quad \frac{2\pi\ f\ ène}{B0\varepsilon0} \tag{5}$$

où f [Hz] est la fréquence de fonctionnement, et B0 [T] est l'induction du champ magnétique parallèle à la direction de propagation de l'onde (perpendiculaire à l'axe de l'antenne).

Pour le mode Alfvén, d'après Bannister et al. [35], le nombre d'onde est formulé comme suit :

$$kA = \frac{2\pi\ f}{c} \quad \frac{nimi}{\varepsilon0} \tag{6}$$

où ni [1/m3] est la concentration ionique, égale à ne , et mi [kg] est la masse ionique moyenne, estimée à 3,17 × 10−26 kg [35].

Pour le cas ionosphérique « classique » (dans lequel le front d'onde entre dans l'ionosphère et est soumis à une absorption, une réfraction et une réflexion, uniquement en fonction de la fréquence et du ne), le nombre d'onde est donné par DJ Bem [38] comme suit :

$$kJ = \frac{4\pi\ 2}{\cdot\ 2_0} - \frac{e\ 2ne}{mes\varepsilon0c^{\ 2}} \tag{7}$$

de la même manière que la dérivation de la formule (3).

Les quatre rayons des zones de rayonnement suivantes - inductive (pour la longueur d'antenne h [m] << λ 0), Fresnel, Fraunhofer et Fraunhofer classique - ont été calculés pour différentes concentrations d'électrons exemplaires : couche F ionosphérique dans des conditions de lumière du jour (1,4 × 1012 m−3 [38]), la couche F ionosphérique pour les conditions nocturnes (4 × 1011 m−3 [38]) et les conditions héliosphériques, généralisées à 108 m−3 [39].

tt ff

Les trois nombres d'onde considérés ont été représentés sur les figures 2 à 4. Chaque concentration électronique a été utilisée pour les calculs pour trois longueurs d'antenne différentes h : 1 m, 10 m et 100 m (antenne traitée comme un dipôle symétrique). On peut remarquer que les ordres de grandeur des nombres d'onde pour les cas d'Alfvén diffèrent considérablement de ceux des cas de Whistler et d'ionosphère classique - cela entraînera plus tard l'exclusion de certains cas d' Alfvén de la comparaison directe avec d'autres cas en raison de leur tailles gargantuesques (par rapport à l'ouverture réelle de l'antenne). Pour le cas héliosphérique, on peut également remarquer que la fonction classique-ionosphérique de k (Formule (7)) commence à se chevaucher avec la plage du mode siffleur de la fonction k (Formule (5)) — il est donc important de prendre en considération la gamme de fréquences à laquelle la fonction donnée est applicable et les tailles finales des rayons des zones de rayonnement résultantes, la priorité étant donnée au rayon le plus petit.

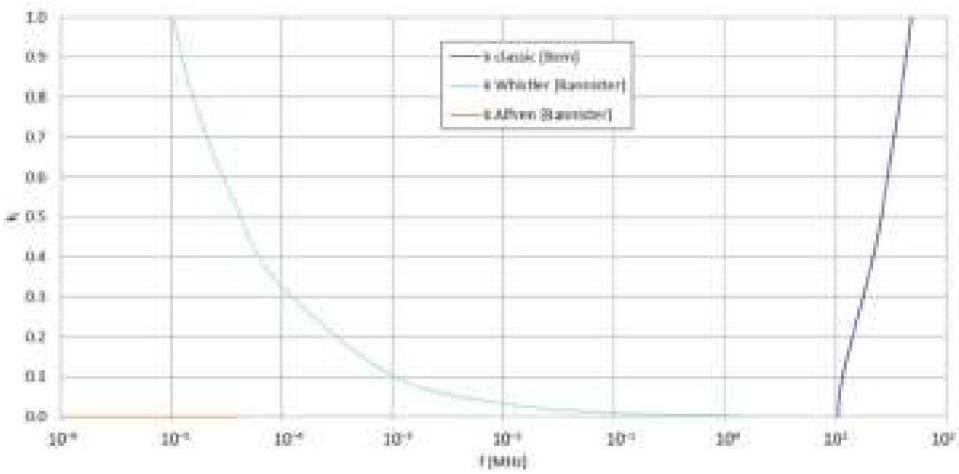


Figure 2. Valeurs calculées pour les nombres d'onde k pour le cas classique (ionosphérique), le mode de propagation Whistler et le mode de propagation Alfvén pour la densité électronique de la lumière du jour de la couche F ionosphérique (1,4 × 1012 m−3).

Machine Translated by Google

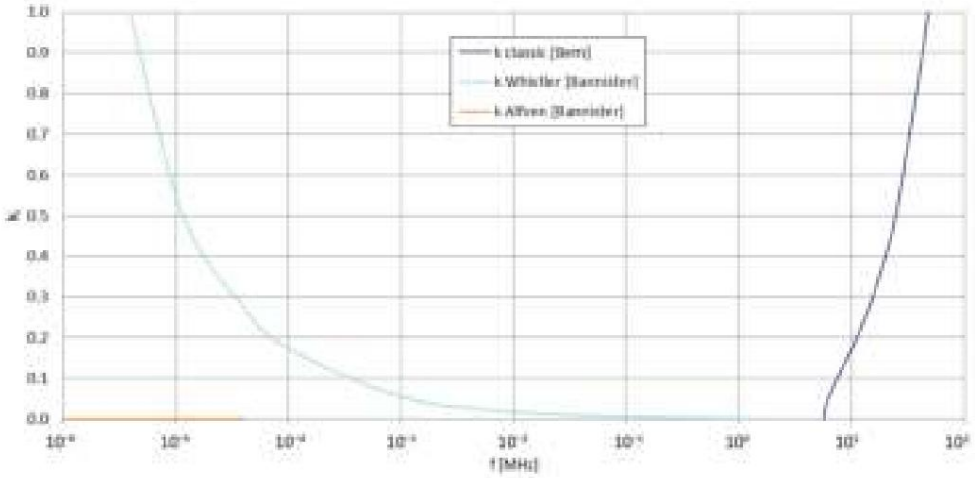


Figure 3. Valeurs calculées pour les nombres d'onde k pour le cas classique (ionosphérique), le mode de propagation Whistler et le mode de propagation Alfvén pour la densité électronique nocturne de la couche F ionosphérique (4 × 1011 m−3).

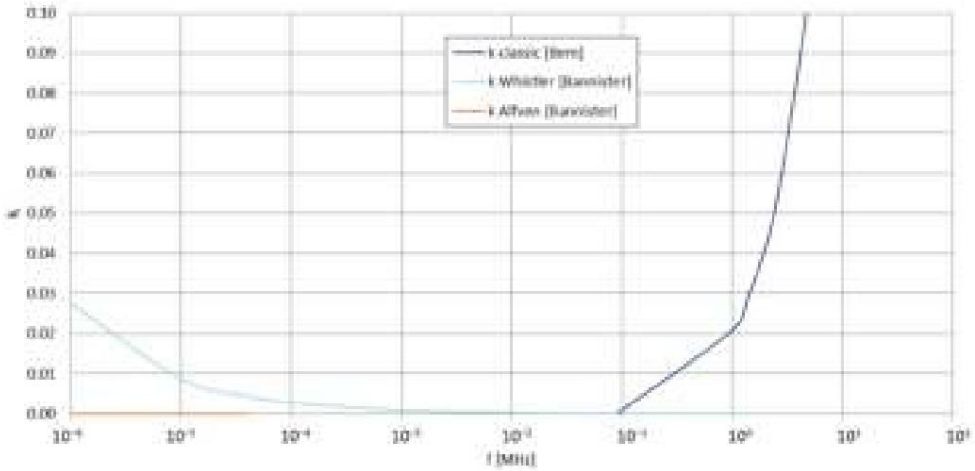


Figure 4. Valeurs calculées pour les nombres d'onde k pour le cas classique (ionosphérique), le mode de propagation Whistler et le mode de propagation Alfvén pour la densité électronique héliosphérique approchée (108 m−3).

Les figures 5 à 7 présentent les rayons des zones de rayonnement — Fraunhofer approximatif (Formule (3)), Fresnel (Formule (1)), Fraunhofer (Formule (2)) et longueurs d'onde pour les cas non plasmatiques (pour λ << h) — pour kJ et h = 1 m ; Figures 8 à 10 : pour kJ et h = 10 m et Figures 11 à 13 : pour kJ et h = 100 m. On peut remarquer que la zone Fraunhofer de la Formule (2) s'agrandit considérablement avec l'augmentation des dimensions de l'antenne, tandis que l' indication approximative de la zone Fraunhofer (par exemple, indiquant la présence – ou l'absence – de certains composants de champs) reste plus convergente vers la plage inductive (longueur d'onde), la zone de Fresnel étant positionnée comme la plus grande dans ces ordres de grandeur. Ces ensembles de fonctions et de tracés s'appliquent généralement aux observations radio à faible fréquence MHz.

La figure 14 montre les rayons approximatifs des zones de rayonnement Fraunhofer (3) pour kW et toutes les plages ne considérées (indépendantes de la formule h) ; Figures 15 à 17 : pour les rayons des zones de Fresnel (1) pour kW et toutes les plages ne et valeurs h considérées ; Figures 18 à 20 : pour les rayons des zones Fraunhofer (2) pour kW et toutes les plages ne et valeurs h considérées ; Figures 21 à 23 : pour les rayons des zones de Fresnel (1) pour kA et toutes les plages ne et valeurs h considérées (les rayons de la zone Fraunhofer pour kA ont été omis en raison de grandes différences dans les ordres de grandeur de leurs valeurs par rapport aux valeurs de l'ouverture de l'antenne h).

Machine Translated by Google

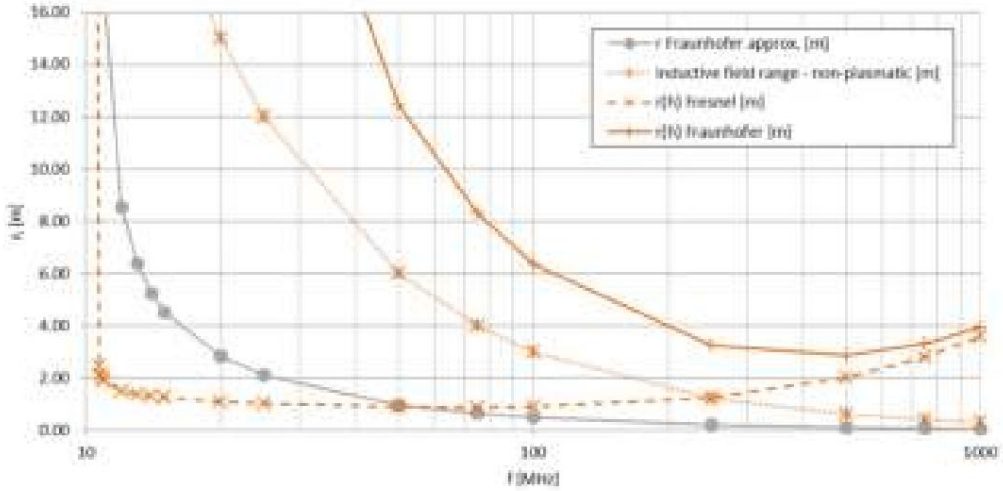


Figure 5. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique de la lumière du jour de la couche F ionosphérique (1,4 × 1012 m−3) et h = 1 m.

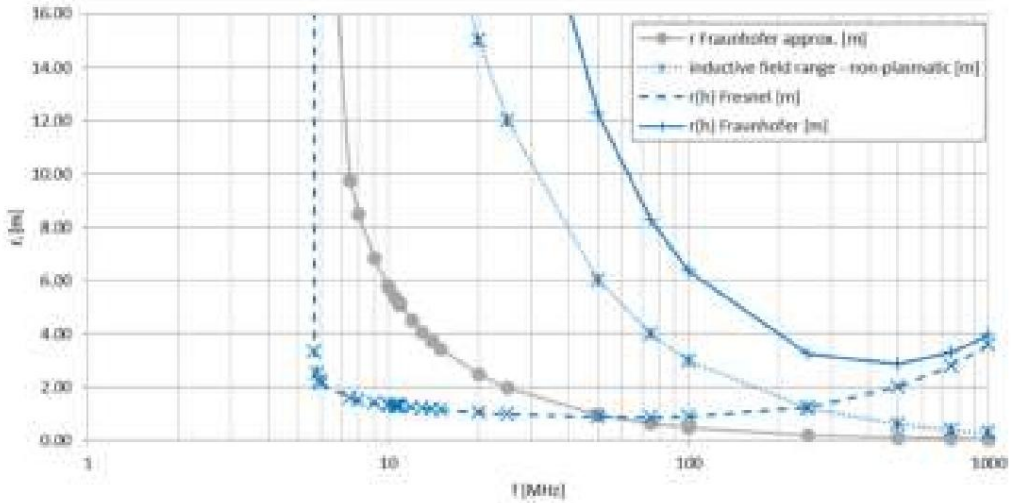


Figure 6. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique nocturne de la couche F ionosphérique (4 × 1011 m−3) et h = 1 m.

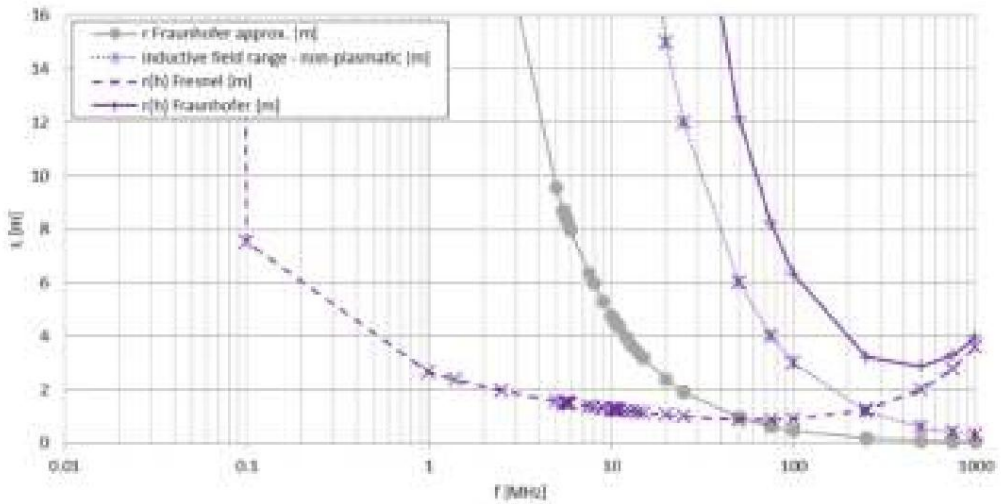


Figure 7. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique héliosphérique approchée (108 m−3) et h = 1 m.

Machine Translated by Google

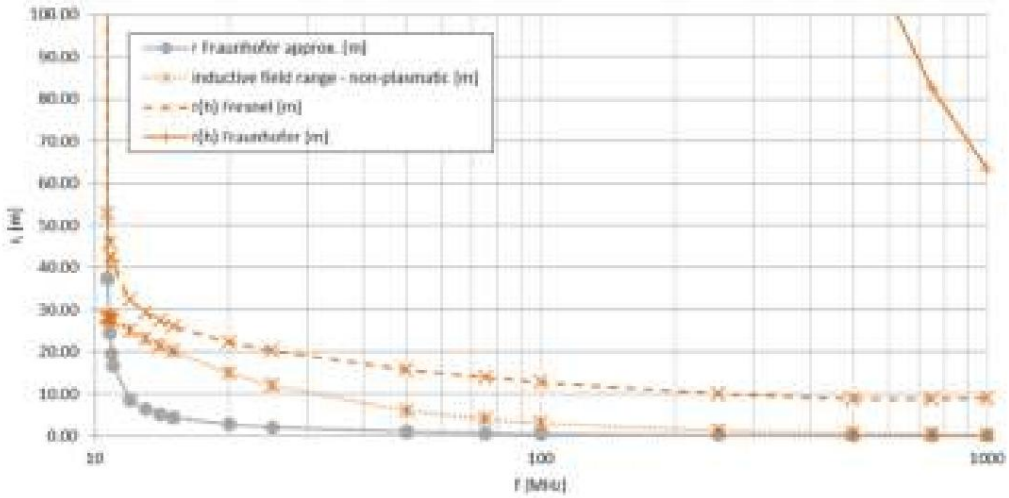


Figure 8. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique de la lumière du jour de la couche F ionosphérique (1,4 × 1012 m−3) et h = 10 m.

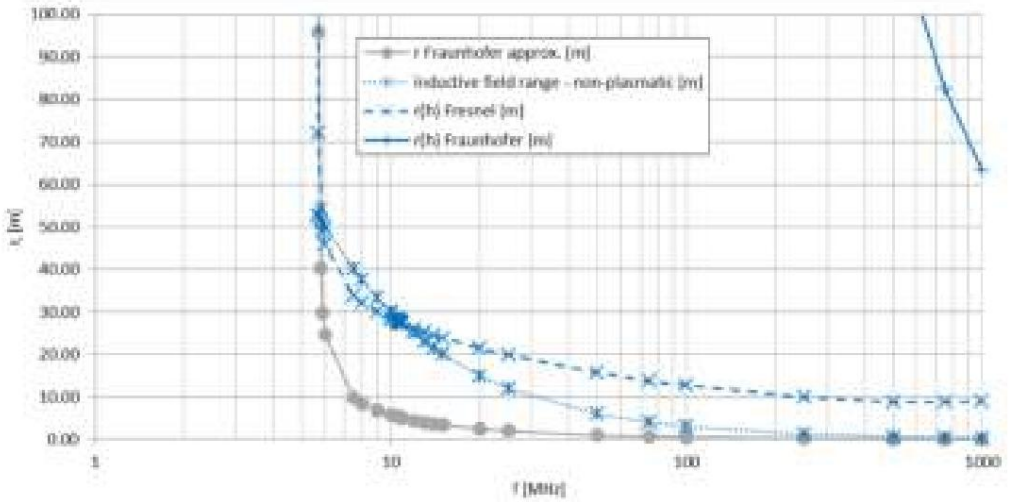


Figure 9. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique nocturne de la couche F_{tt} ionosphérique (4 × 1011 m−3) et h = 10 m.

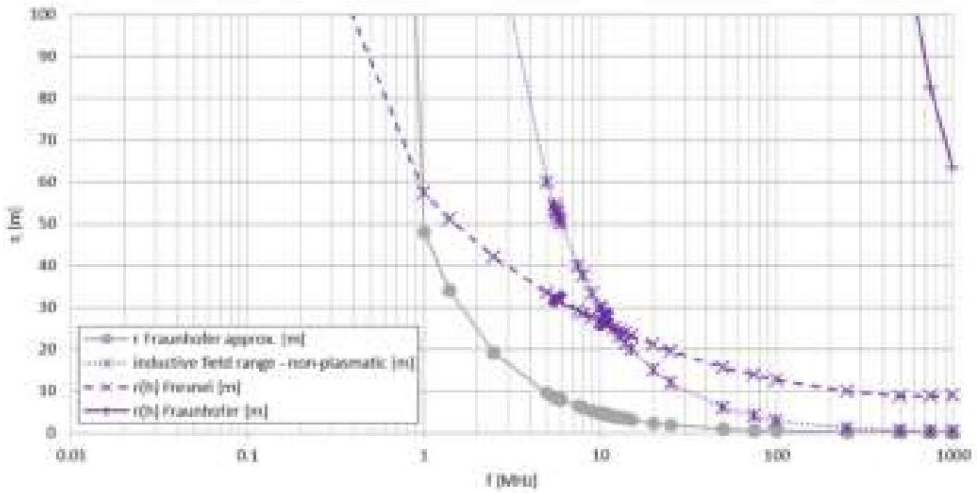


Figure 10. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique héliosphérique approximative (108 m−3) et h = 10 m.

Machine Translated by Google

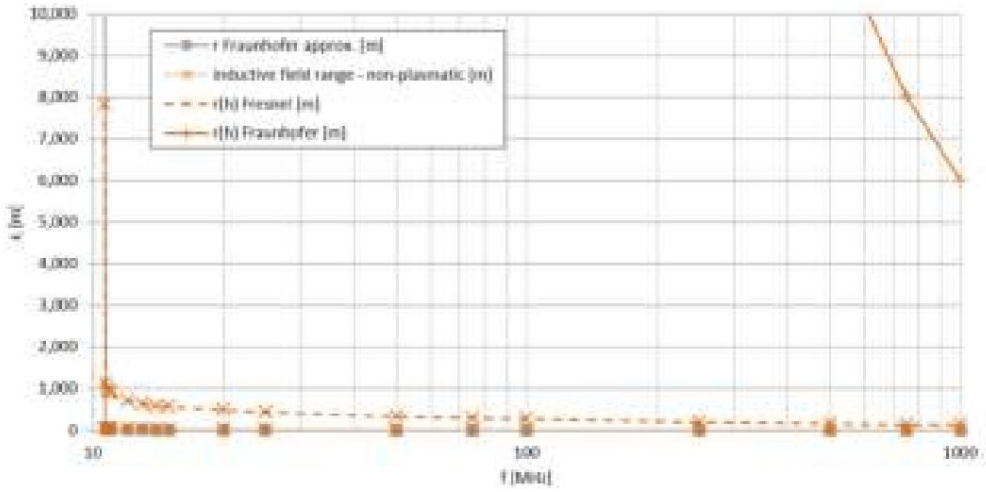


Figure 11. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique de la lumière du jour de la couche F ionosphérique (1,4 × 1012 m−3) et h = 100 m.

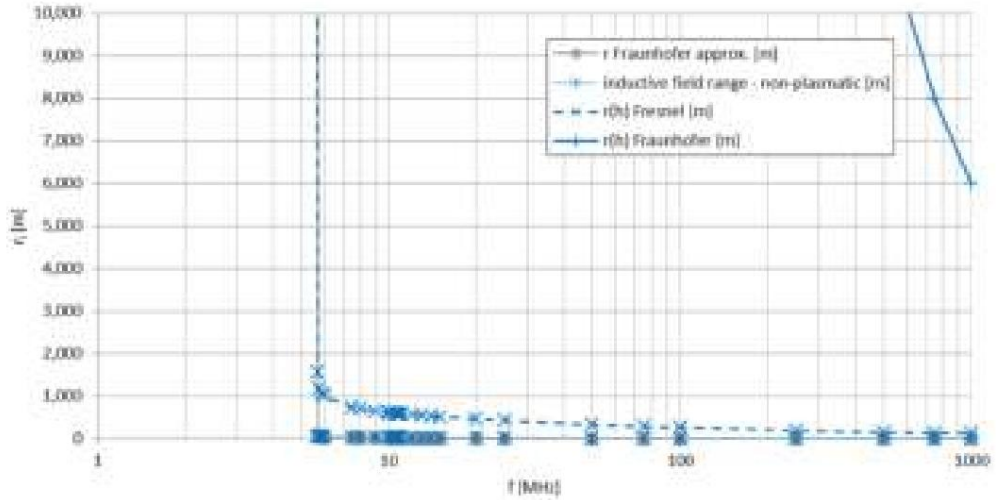


Figure 12. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique nocturne de la couche F ionosphérique (4 × 1011 m−3) et h = 100 m.

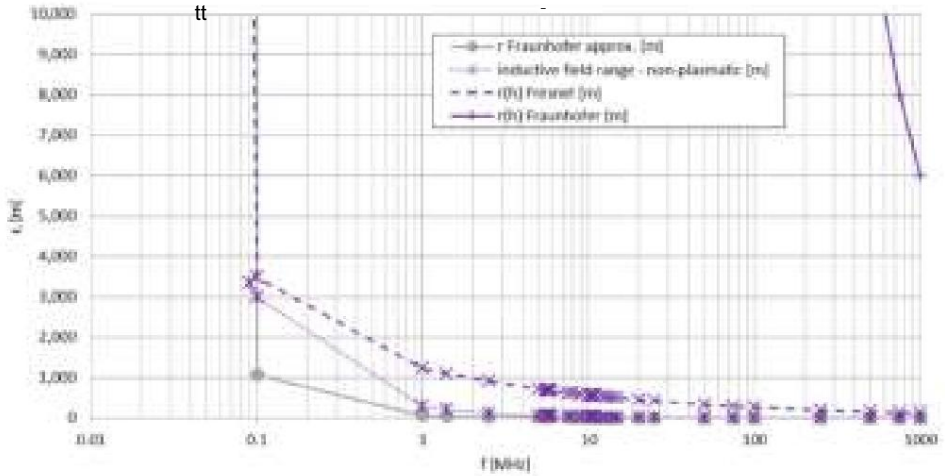


Figure 13. Rayons calculés des zones de rayonnement pour l'approche ionosphérique classique (kJ) pour la densité électronique héliosphérique approchée (108 m−3) et h = 100 m.

Machine Translated by Google

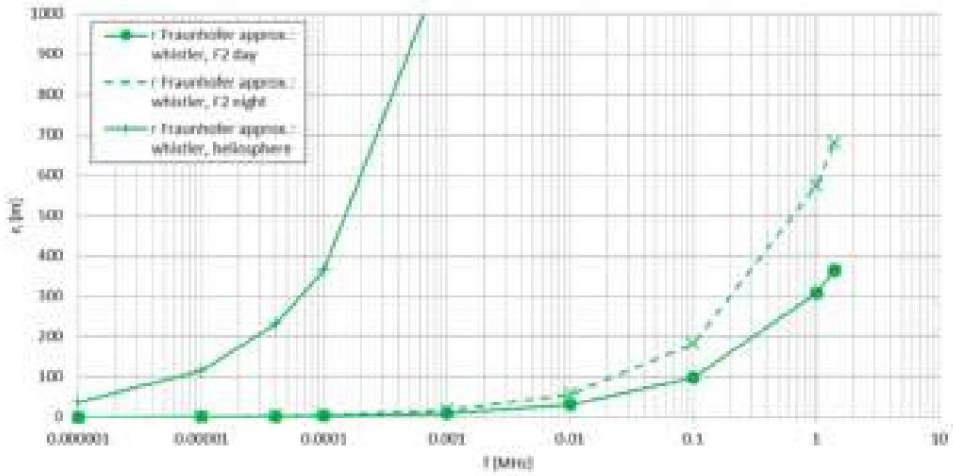


Figure 14. Calcul des rayons approximatifs des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation du sifflement (kW) pour h = 1 m et différentes concentrations d'électrons.

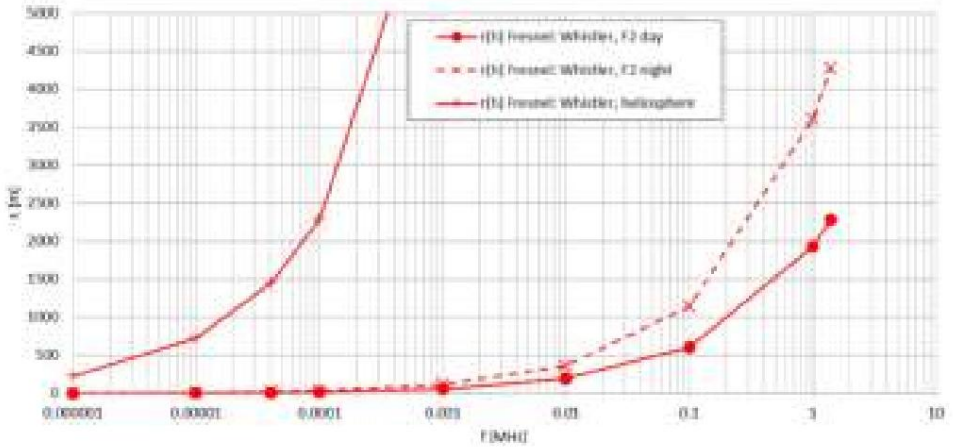


Figure 15. Rayons calculés des zones de rayonnement de Fresnel pour le mode de propagation Whistler (kW) pour h = 1 et différentes concentrations d'électrons.

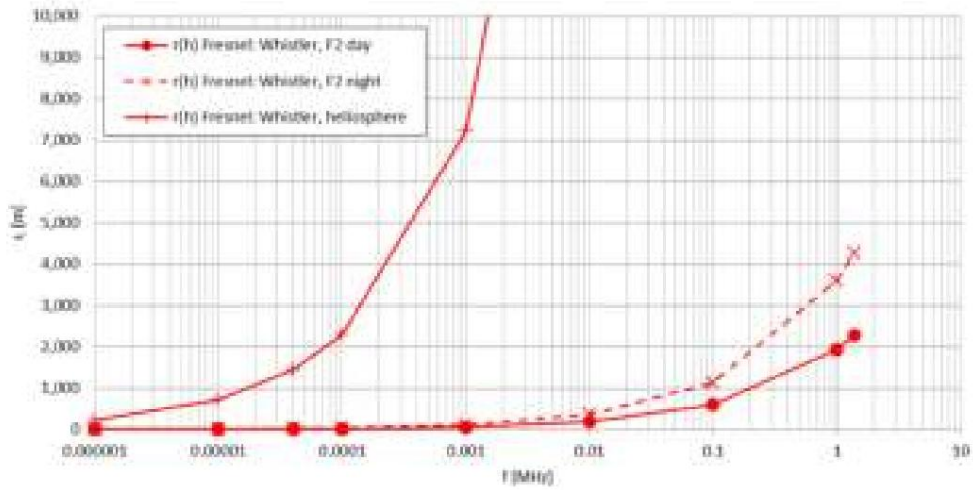
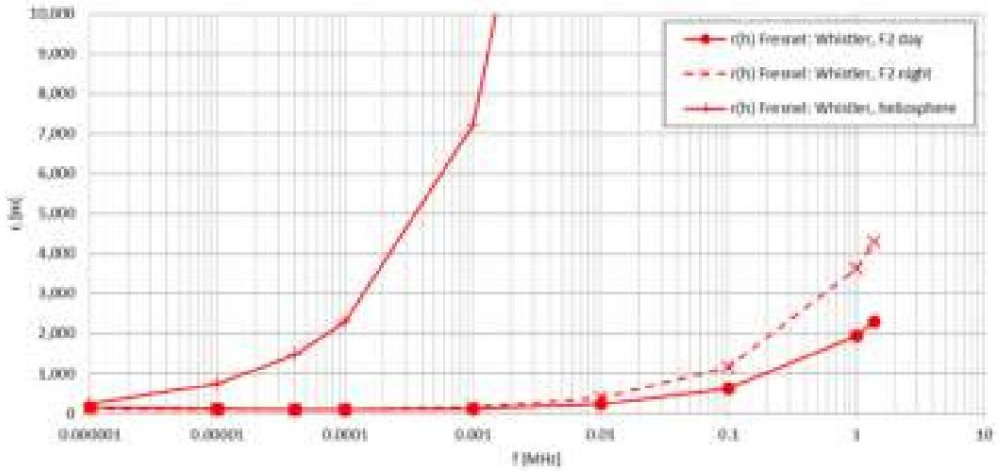


Figure 16. Rayons calculés des zones de rayonnement de Fresnel pour le mode de propagation Whistler (kW) pour h = 10 m et différentes concentrations d'électrons.

Machine Translated by Google



ff

Figure 17. Rayons calculés des zones de rayonnement de Fresnel pour le mode de propagation Whistler (kW) pour ff h = 100 m et différentes concentrations d'électrons. ff

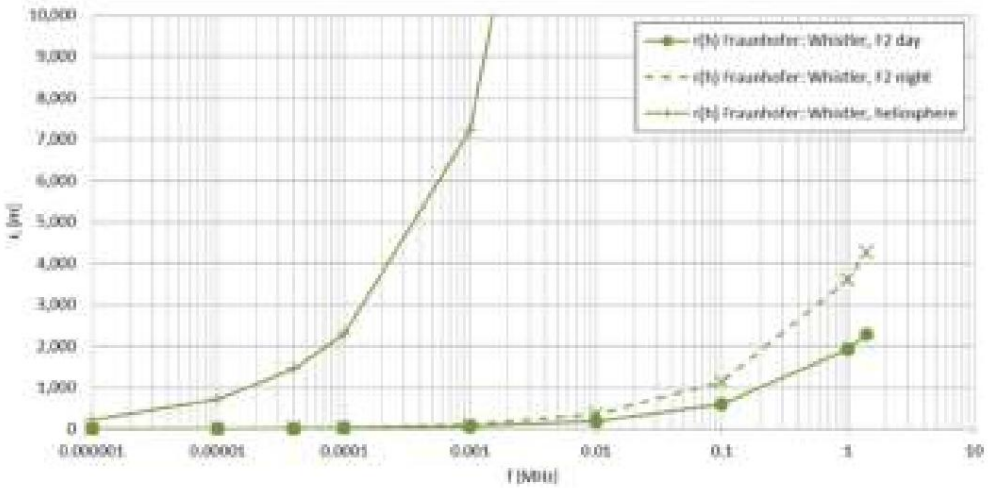


Figure 18. Rayons calculés des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Whistler (kW) pour h = 1 m et différentes concentrations d'électrons.
ff
ff
ff

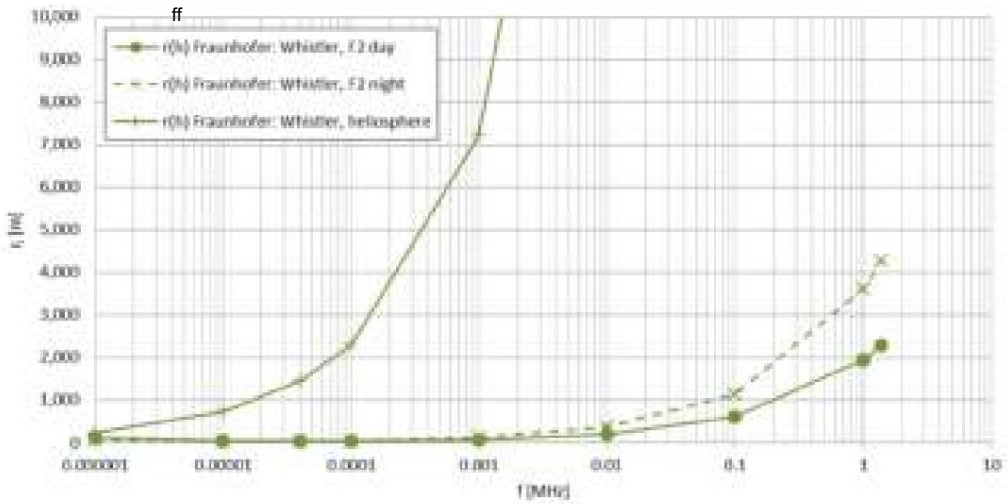


Figure 19. Rayons calculés des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Whistler (kW) pour h = 10 m et différentes concentrations d'électrons.

ff

ff

ff

Machine Translated by Google

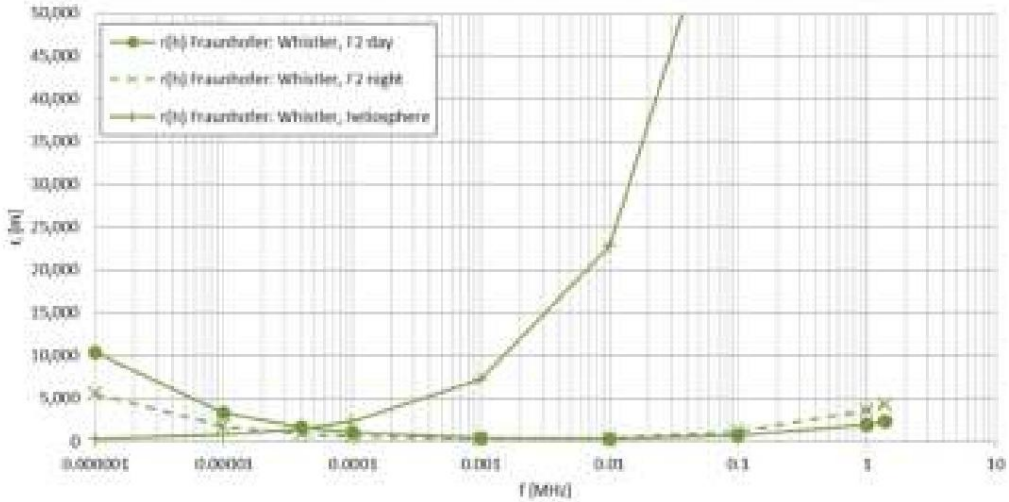


Figure 20. Rayons calculés des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Whistler (kW) pour h = 100 m et différentes concentrations d'électrons.

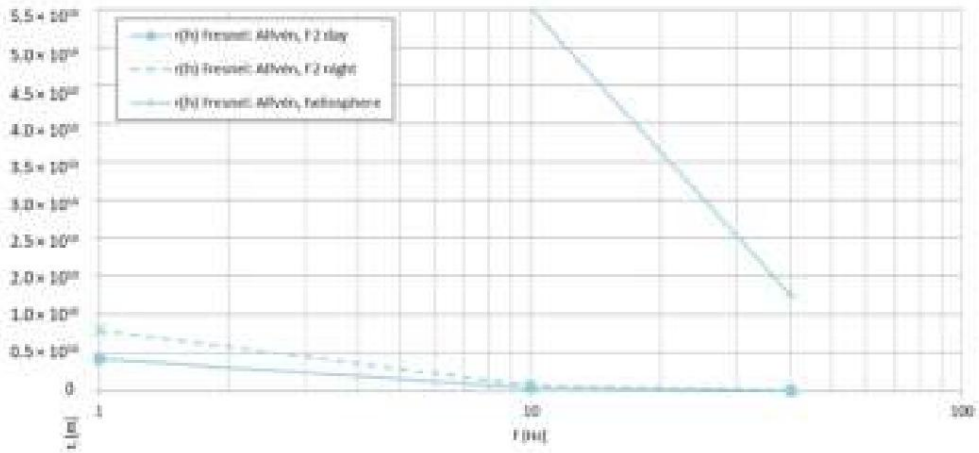


Figure 21. Calcul des rayons des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Alfvén (kA) pour h = 1 m et différentes concentrations d'électrons.

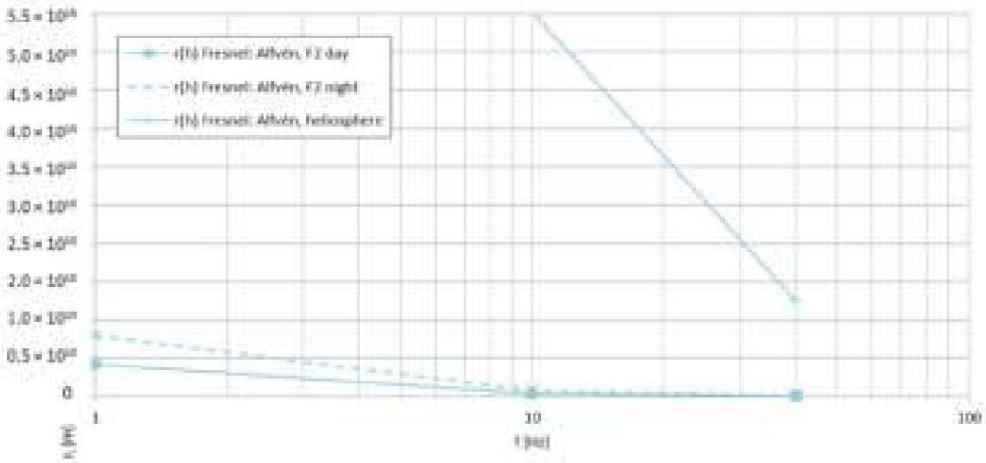


Figure 22. Rayons calculés des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Alfvén (kA) pour h = 10 m et différentes concentrations d'électrons.

Machine Translated by Google

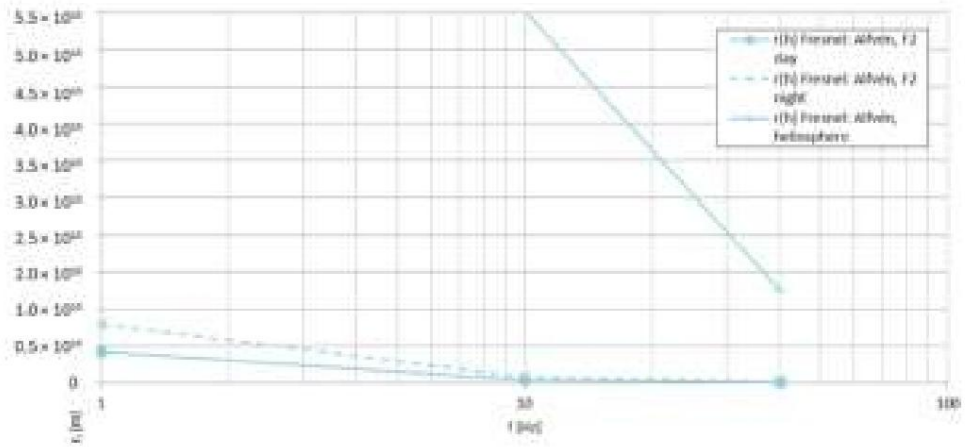


Figure 23. Rayons calculés des zones de rayonnement Fraunhofer pour le mode de propagation Alfvén (kA) pour h = 100 m et différentes concentrations d'électrons.

On peut remarquer que les rayons approximatifs de la zone Fraunhofer (3) pour les conditions héliosphériques restent plusieurs ordres de grandeur plus élevés pour une fréquence donnée que pour les autres environnements riches en électrons. Les rayons des zones Fraunhofer et Fresnel calculés à l'aide de formules précises montrent principalement une dépendance à la longueur de l'antenne et à son ordre de grandeur tout en conservant la relation générale (et similaire au cas précédent) entre les cas héliosphériques et riches en électrons. Le cas de la zone Fraunhofer pour la plus grande longueur d'antenne (100 m) commence à présenter des changements/augmentations de longueur de rayon pour les fréquences inférieures (~ kHz et inférieures), à mesure que la longueur de l'antenne devient plus proportionnelle à la longueur d'on

3. Evolution du festonnage du diagramme de rayonnement de l'antenne

La festonnée du diagramme de rayonnement (et, par le théorème de réciprocité [40], de réception) = de l'antenne peut être décrite comme l'apparition et la relocalisation, en fonction de la longueur ou de la fréquence, des minimums et des maximums, redirigeant la puissance transmise par le l'antenne dans certaines directions ou rendant l'antenne plus sensible à la réception du signal sous certains angles. Si la solution exacte [36] décrivant le nombre de maximums du motif - c'est-à-dire les lobes - est adaptée aux conditions riches en électrons de la même manière que (3) et (7), la solution plasmatique pour le nombre nPlasma [-] du les pétoncles du motif peuvent être définis comme suit :

$$nPlasma = h\left(\frac{4}{\lambda^2} - \frac{e^2 ne}{me\varepsilon_0 \pi\, 2c^2}\right) \quad (8)$$

où les parenthèses définissent la limite supérieure de la formule (c'est-à-dire qu'une valeur supérieure à 1 donne nPlasma = 2, une valeur supérieure à 2 donne nPlasma = 3 etc.).

Les figures 24 et 25 présentent le nombre de lobes (valeurs de la formule entre parenthèses) pour le milieu héliosphérique (ne = 108 m−3) pour tous les cas de propagation considérés (approche classique, Whistler et Alfvén) et tous les antennes considérées. longueurs h (1, 10 et 100 m) ; Figures 26 à 28 : pour la couche F ionosphérique dans des conditions de lumière du jour (ne = 1,4 × 1012 m−3) et Figures 29 à 32 : couche F ionosphérique pour des conditions nocturnes (ne = 4 × 1011 m−3).

On peut remarquer que pour les conditions héliosphériques, la gamme MHz des fréquences du signal connaît une augmentation exponentielle du nombre de lobes du motif, qui augmente de manière significative avec l'allongement de l'antenne ; pour les autres fréquences (inférieures), la forme du motif reste presque constante. Pour les conditions plus denses en électrons (ionosphère F2 diurne), les fréquences plus basses commencent à présenter une forte augmentation exponentielle du nombre de lobes du motif, à l'exception du cas d'Alfvén, qui reste presque constant. Un mécanisme similaire , mais inférieur aux valeurs obtenues, peut être observé pour les conditions de concentration nocturne d'électrons F2 dans l'ionosphère ; cela peut être lié au fait que la longueur de l'antenne devient plus grande

Machine Translated by Google

proportionnel à la longueur d'onde du signal pour les basses fréquences et devenant rapidement surdimensionné pour la longueur d'onde du signal pour les fréquences plus élevées - le premier mécanisme peut être remarqué comme « amplifié » par l'augmentation de la densité électronique, et le dernier mécanisme apparaît comme présent à l'échelle mondiale.

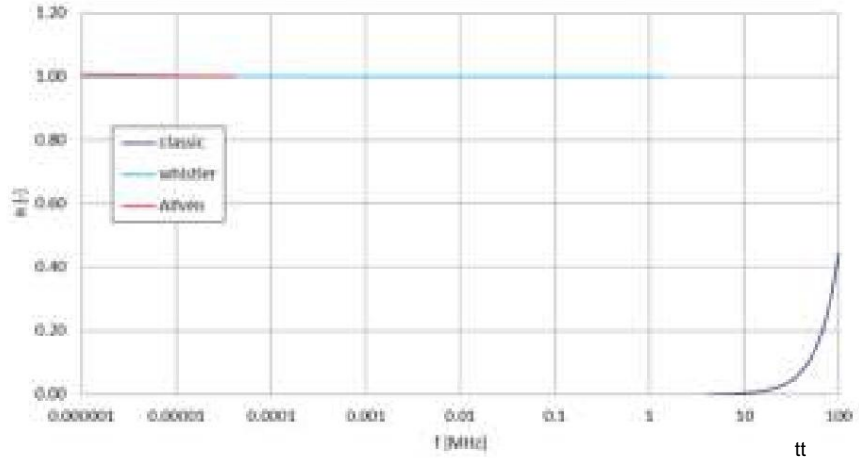


Figure 24. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 1 m et un environnement héliosphérique (ne = 108 m−3).

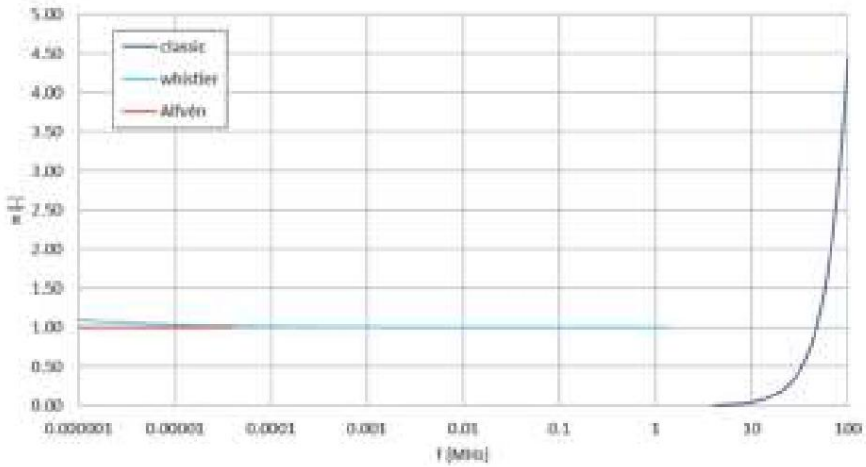


Figure 25. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 10 m et un environnement héliosphérique (ne = 108 m−3).

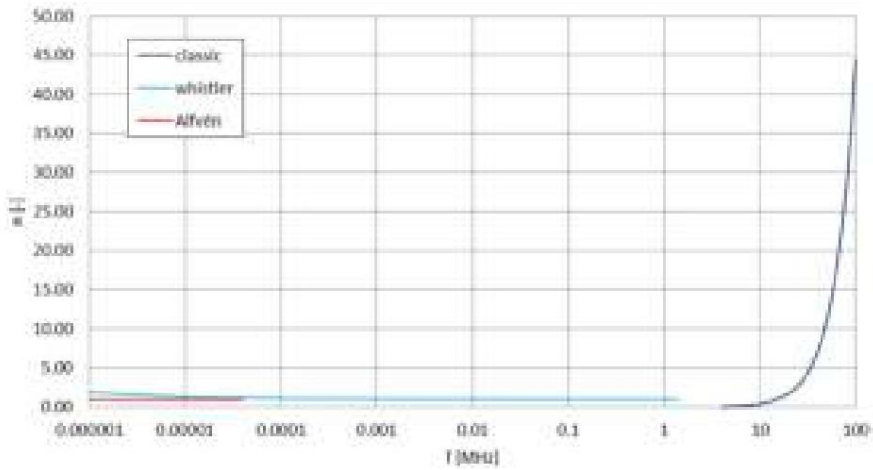


Figure 26. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 100 m et un environnement héliosphérique (ne = 108 m−3).

Machine Translated by Google

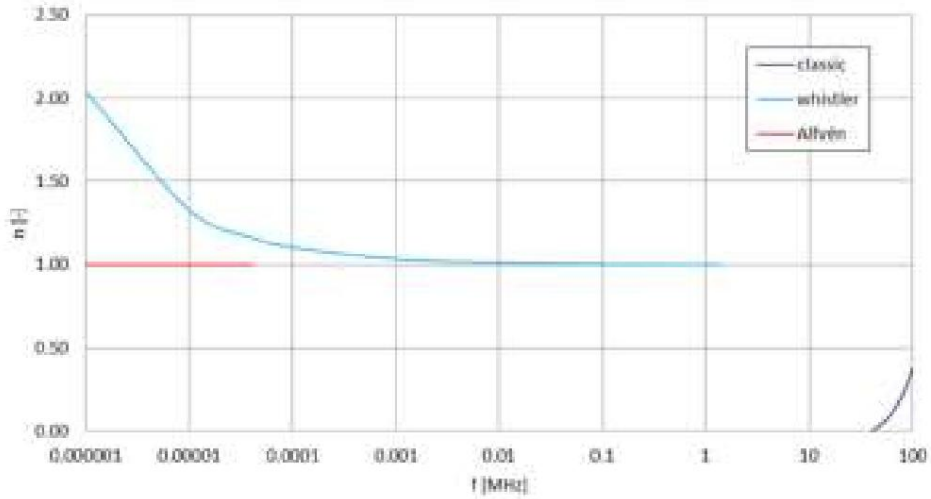


Figure 27. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 1 m et un environnement de lumière du jour de la couche F2 ionosphérique (ne = 1,4 × 1012 m−3).

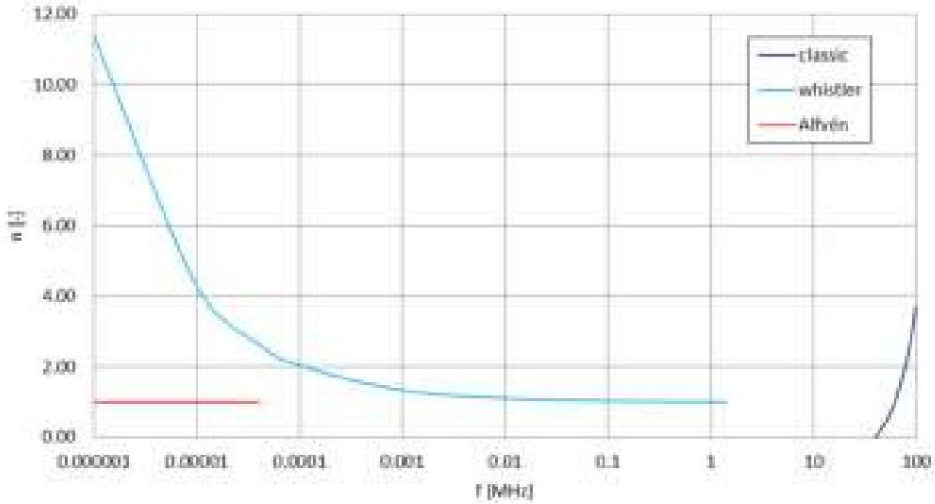


Figure 28. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 10 m et un environnement de lumière du jour de la couche F2 ionosphérique (ne = 1,4 × 1012 m−3).

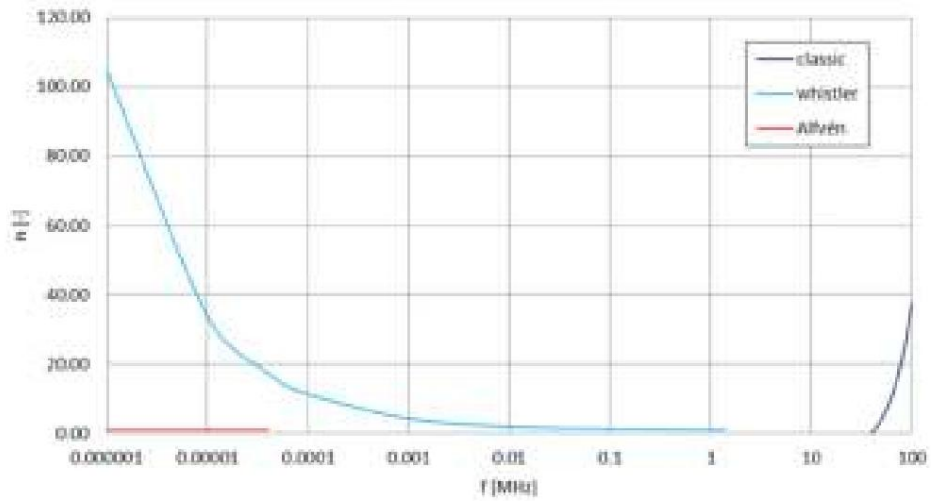


Figure 29. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 100 m et un environnement de lumière du jour de la couche F2 ionosphérique (ne = 1,4 × 1012 m−3).

Machine Translated by Google

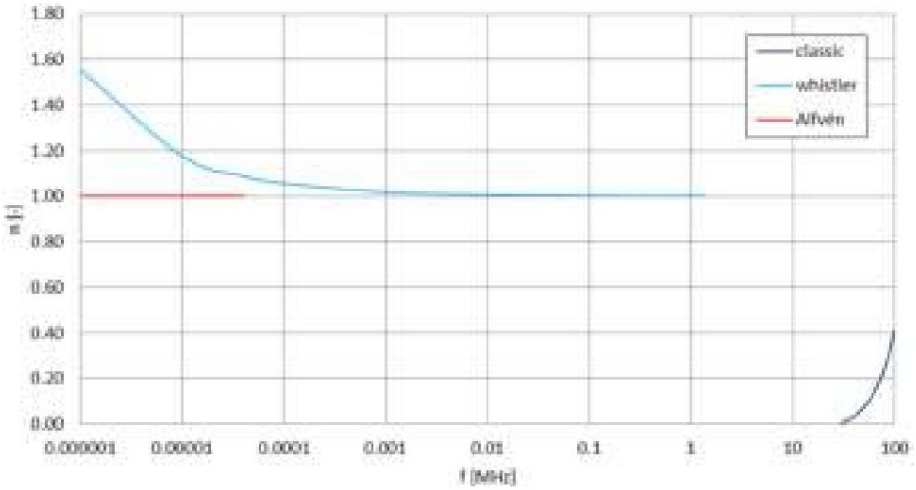


Figure 30. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 1 m et un environnement nocturne ionosphérique de couche F2 (ne = 4 × 1011 m−3).

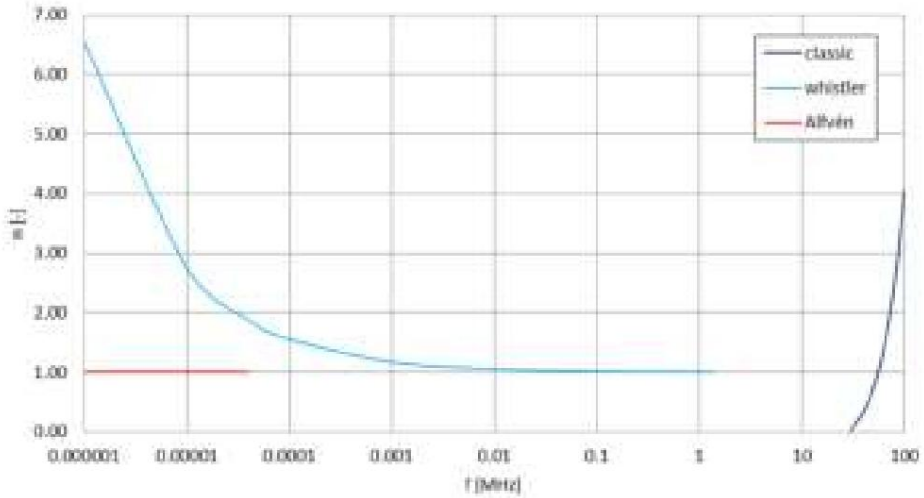


Figure 31. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 10 m et un environnement nocturne ionosphérique de couche F2 (ne = 4 × 1011 m−3).

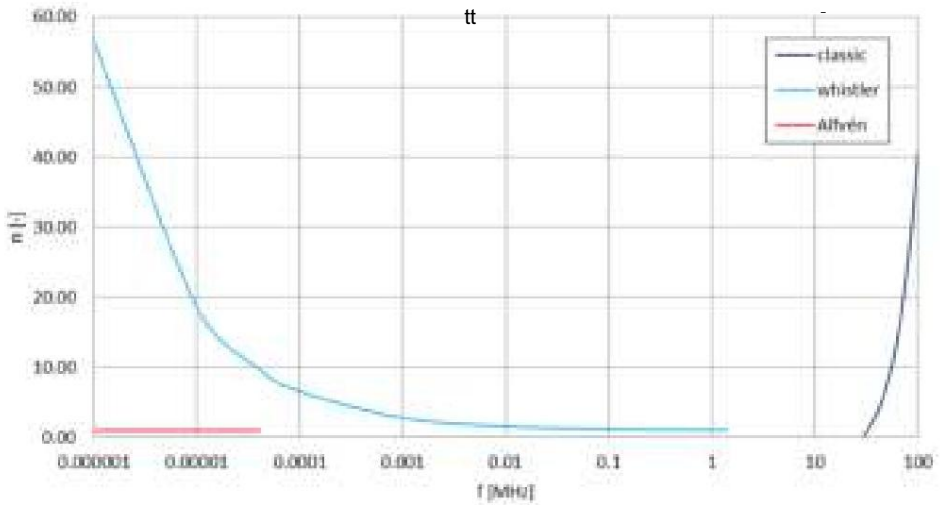


Figure 32. Nombre calculé de lobes du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour une longueur d'antenne h = 100 m et un environnement nocturne ionosphérique de couche F2 (ne = 4 × 1011 m−3).

Machine Translated by Google

4. Evolution de la directivité du diagramme de rayonnement de l'antenne

Le paramètre de directivité de l'antenne D [-] peut être expliqué comme la capacité de l'antenne à former un faisceau concentré d'énergie rayonnée à une certaine largeur angulaire – définie comme l'intensité du rayonnement dans une direction/un angle donné divisée par la moyenne. intensité du rayonnement sur l'ensemble du diagramme de rayonnement (2π). Avec le rendement de l'antenne ηA [-] (qui dépend de la résistance au rayonnement de l'antenne et de sa résistance aux pertes), il donne le gain de l'antenne G [-] : G = DηA [40] ; le gain de l'antenne est donc directement proportionnel à la directivité, l'efficacité de l'antenne dépendant fortement des pertes de rayonnement dans l'application réelle de l'engin spatial (la résistance au rayonnement d'un dipôle en fonction du rapport longueur/longueur d'onde reste bien connue [40]) .

La formule de directivité peut être exprimée comme suit :

$$Di = 2 \left(\frac{1}{3} - \frac{\cos(2hki)}{(2hki)^2} + \frac{\text{péché}(2hki)}{(2hki)^3} \right)^{-1} \quad (9)$$

avec ki défini pour chaque cas (ionosphérique, siffleur ou Alfvén) à l'aide des formules (5), (6) et (7). Les figures 33 à 35 présentent la directivité calculée pour le cas classique (7) pour différentes concentrations d'électrons et longueurs d'antenne h = 1, 10 et 100 m précédemment considérées ; de même, les figures 36 à 38 utilisent le nombre d'onde de Whistler (5) et les figures 39 à 41 : le nombre d'onde d'Alfvén (6).

Pour les cas ionosphériques classiques, plus l'antenne est longue, plus la directivité est constante, atteignant une valeur de 6 pour les hautes fréquences MHz ; pour la gamme de fréquences kHz et inférieures, la directivité atteint des valeurs inférieures à 1, ce qui indique l'absence de lobes séparés bien formés dans le diagramme de rayonnement (comme dans les figures du paragraphe précédent). Pour le mode de propagation Whistler, le comportement général des changements de directivité augmente avec les valeurs de fréquence avec l'augmentation de la longueur de l'antenne ; les deux conditions ionosphériques montrent deux maximums à environ 6,5, tandis que le cas héliosphérique commence à donner des valeurs plus élevées à la plus grande longueur d'antenne considérée, soit 100 m. Pour le mode de propagation et la gamme de fréquences d'Alfvén, sur la figure 40, les conditions héliosphériques ont produit des erreurs numériques dans la formule (9) et n'ont pas été incluses dans le tracé final ; plus l'antenne est petite, plus elle semble sensible à des concentrations d'électrons plus élevées, la plus grande antenne considérée de 100 m montrant une grande variabilité jusqu'à la concentration d'électrons la plus faible (héliosphérique). Pour tous les cas Alfvén, la valeur maximale de directivité atteint 4,1.

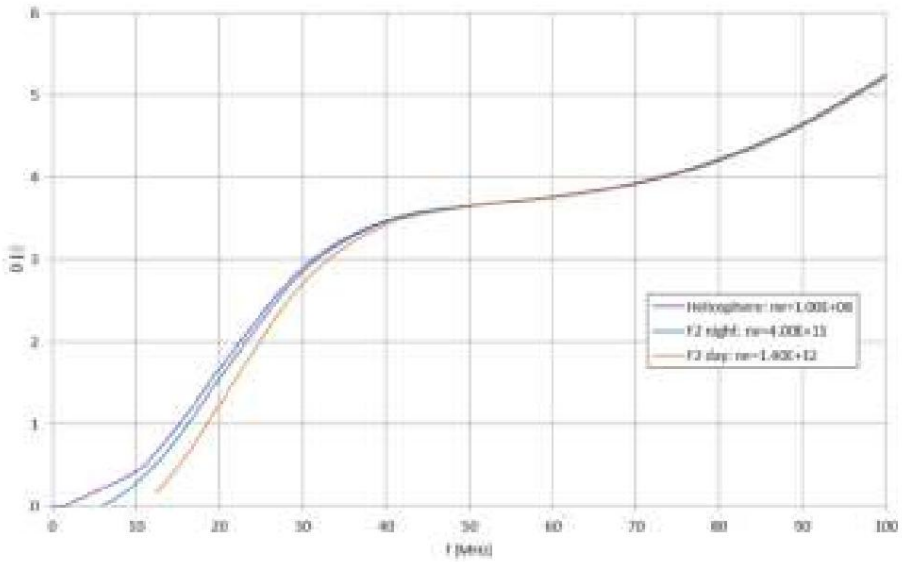


Figure 33. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 1 m et un nombre d'onde kJ (7).

Machine Translated by Google

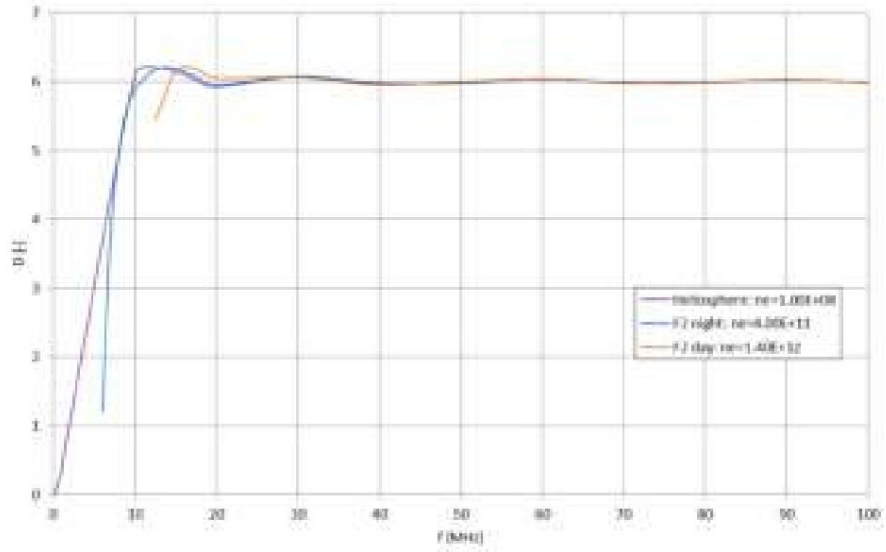


Figure 34. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 10 m et un nombre d'onde kJ (7).

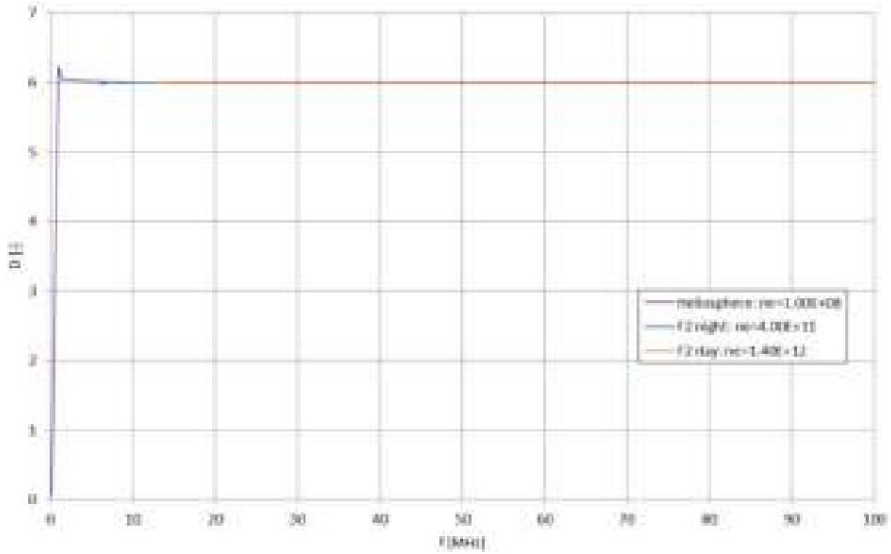


Figure 35. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 100 m et un nombre d'onde kJ (7).

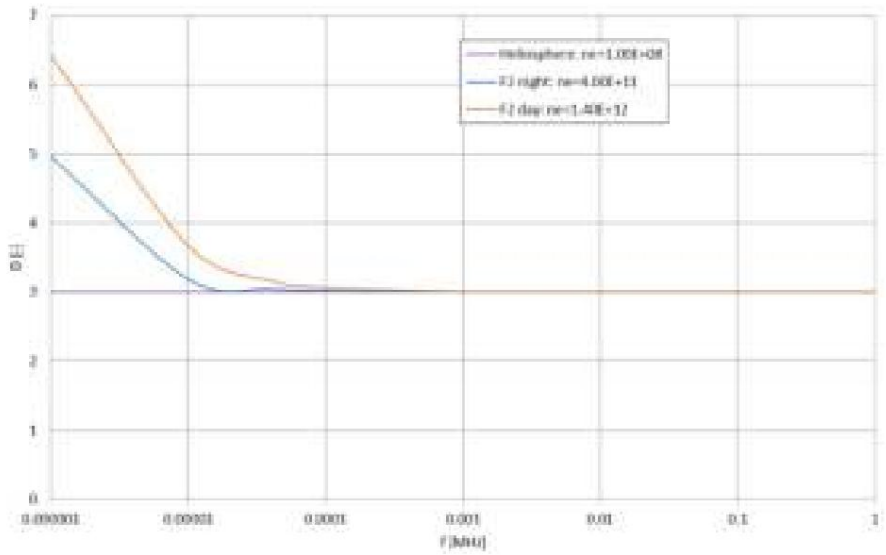


Figure 36. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 1 m et un nombre d'onde kW (5).

Machine Translated by Google

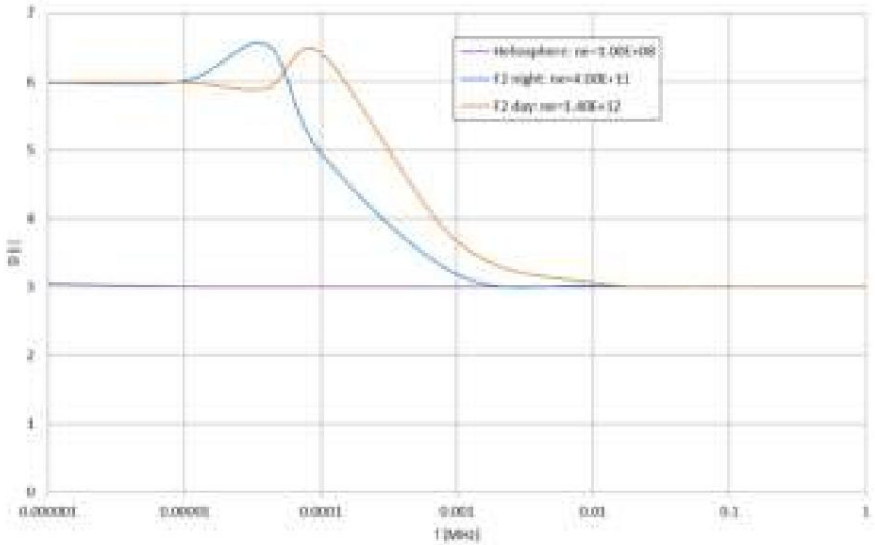


Figure 37. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 10 m et un nombre d'onde kW (5).

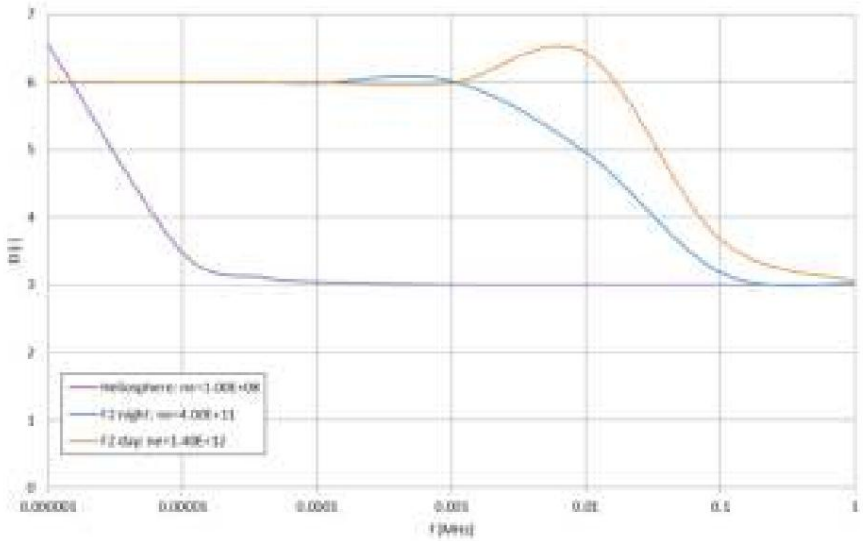


Figure 38. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 100 m et un nombre d'onde kW (5).

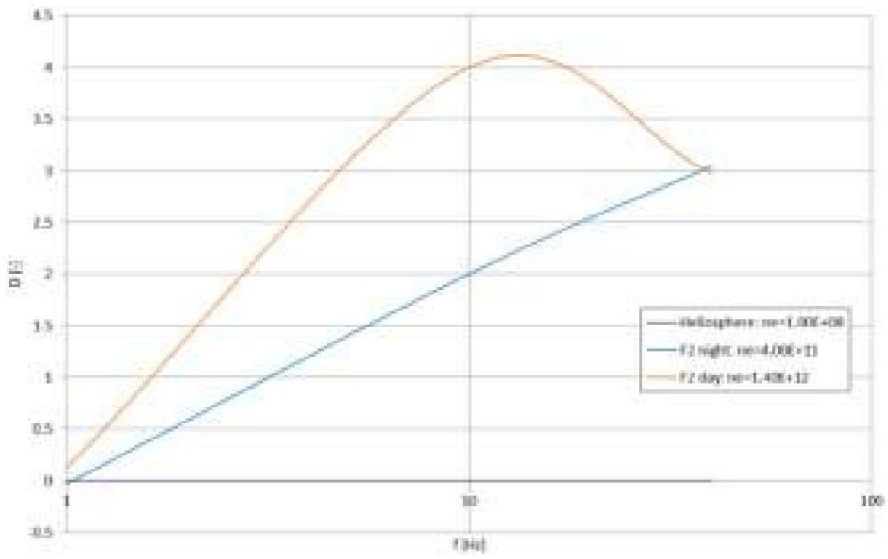


Figure 39. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 1 m et un nombre d'onde kA (6).

Machine Translated by Google

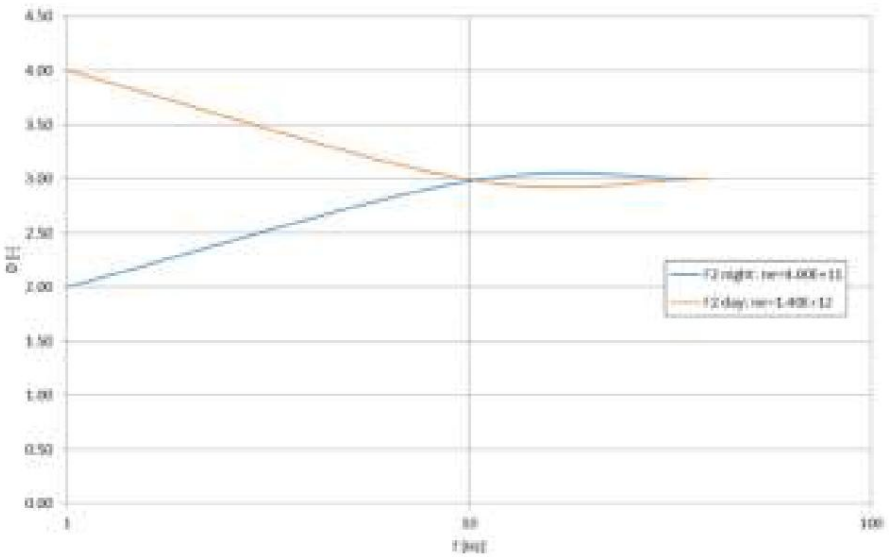


Figure 40. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 10 m et un nombre d'onde kA (6).

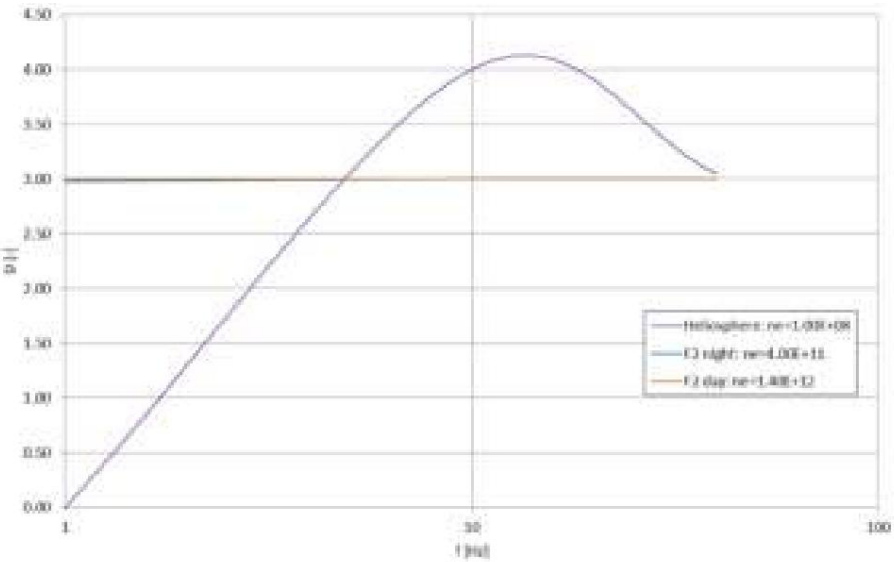


Figure 41. Directivité d'antenne calculée pour une longueur d'antenne h = 100 m et un nombre d'onde kA (6).

5. Coefficient de transformation du diagramme de rayonnement de l'air/vide aux conditions plasmatiques

La vérification expérimentale de la forme du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne, qui intègre toujours la configuration mécanique réelle de l'antenne et du support de l'antenne (par exemple sur un engin spatial), est principalement possible soit pour les conditions atmosphériques terrestres, soit pour des conditions atmosphériques proches. des conditions de vide (si un transfert de chaleur supplémentaire, typique de l'environnement spatial, doit être recréé pour d'autres composants). Des solutions analytiques pour le diagramme de rayonnement/réception d'une antenne donnée immergée dans le plasma de paramètres donnés ont été développées – par exemple, le diagramme de rayonnement de Bannister et al. pour le i-ième nombre d'onde k [35] :

$$\sin \theta \; 1 \; fP(\theta) = kih(1 \quad (10)$$

$$-\cos \theta) \sin ( ) = \sin \quad (1 =) \; 1 \; -\cos \theta \; 2$$

où θ [rad] est l'angle entre le plan de symétrie de l'antenne (considéré comme un dipôle symétrique de longueur totale h [m]) et l'axe principal de l'antenne. Ce diagramme de rayonnement montre la propriété commune (pour les grandes antennes plasmatiques) de rayonner l'énergie dans une direction proche de l'axe principal de l'antenne, qui se manifeste plus fortement avec la longueur croissante de l'antenne [24,34,35] et reste totalement incompatible avec la forme du comportement du motif/antenne dans des conditions non plasmatiques

Machine Translated by Google

Cette propriété reste intéressante non seulement pour les tests d'antennes et les applications réelles des antennes d'émission dans le plasma, mais également pour les antennes de réception immergées dans les plasmas, qui, à mesure que leur diagramme de réception évolue par rapport au plasma qui les entoure, peuvent changer de manière manière qui empêchera certaines des directions vers l'antenne de recevoir tout signal ; cela restera utile pour la description précise, par exemple, des directions entrantes et de l'intensité réelle du signal du rayonnement kilométrique auroral.

Une méthode basée sur une simple transformation des définitions analytiques de la forme du diagramme de rayonnement des conditions air/vide vers les conditions plasmatiques - avec l'hypothèse que cette approche reste valable pour les formes de diagramme définies expérimentalement - pour une valeur d'angle θ donnée. peut être défini comme suit :

$$T\theta=\text{const.}(fA\ \text{réel}(\theta) \rightarrow fP\ \text{réel}(\theta)) : fP\ \text{réel} = fA\ \text{réel}(\theta)\ \frac{fP(\theta)}{fA(\theta)} \quad (11)$$

où fi (θ) sont les fonctions des diagrammes de rayonnement de l'antenne et les indices P, A et real décrivent ensuite les conditions air/vide, plasmatiques et réelles. Le rapport des fonctions du diagramme de rayonnement plasmatique-air/vide nécessite une division supplémentaire de chaque fonction fi (θ) par la valeur maximale atteinte par celle-ci, afin de rendre les cas ultérieurs comparables en valeurs (cela effacerait cependant les informations précises sur la directivité). Naturellement, pour cette transformation, la valeur de fA(θ) ne doit pas atteindre zéro (peut atteindre une valeur réelle de ε →0) et reste valable pour la condition ci-dessous (sinon c'est une tautologie) :

$$\int_{\varepsilon\text{-}\theta}^{\pi-\varepsilon 2} fA(\theta)d\theta = \int_{\varepsilon\text{-}\theta}^{\pi-\varepsilon 2} fP(\theta)d\theta \quad (12)$$

Pour les conditions réelles appliquées à l'espace et les différents signaux radio mesurés mentionnés au paragraphe 1, la direction précise du signal entrant n'est pas toujours connue, et l'évolution du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne pour différentes conditions plasmatiques doit introduire même plus de variables à sa définition. Si un spectre de fréquences bidimensionnel est obtenu à partir d'une telle antenne et que les paramètres de base du plasma sont accessibles (comme décrit au paragraphe 2), le rapport de la formule (11) peut être étendu pour former un coefficient général w dépendant de la fréquence et de l'angle . (θ, f), qui comprend le diagramme de rayonnement plasmatique (10) et le diagramme de rayonnement air/vide pour une antenne linéaire courte [36] ; les différences entre les diagrammes de rayonnement de l'antenne air/vide et plasmatique sont définies dans l'espace autour du fil d'antenne et sur toute la plage possible de θ (avec l'hypothèse facilitant l'intégration que l'antenne est un dipôle symétrique de longueur totale h) :

$$w(\theta, f) = 4\pi \int_{\varepsilon\text{-}\theta}^{\pi-\varepsilon 2} \frac{fP(\theta)}{\max[f_{P.}(\theta)]} \frac{fA(\theta)}{\max[fA(\theta)]-1} d\theta = 4\pi \int_{\varepsilon\text{-}\theta}^{\pi-\varepsilon 2} \frac{\text{péché}\ \frac{1}{2}kih(1-\cos\theta)}{\text{péché}\ \theta(1-\cos\theta)\cos 2\ \frac{2\pi}{c} fh\cos\theta} \frac{\max[fA(\theta)]}{\max[f_{P.}(\theta)]} d\theta \quad (13)$$

Une solution approchée peut être calculée comme suit :

$$w(\theta, f) \approx \sum_{\max[f\ 2}^{n} \frac{\max[fA(\theta)]\ 1\ \theta i\ i=1}{f_{P.}(\theta)]} \frac{\text{péché}\ \frac{1}{2}kih(1-\cos\theta i)}{\sin\theta i(1-\cos\theta i)\cos 2\ \frac{2\pi\ fh}{c}\cos\theta i} + \frac{\text{péché}\ \frac{1}{2}kih(1-\cos\theta i-1)}{\sin\theta i-1(1-\cos\theta i-1)\cos 2\ \frac{2\pi\ fh}{c}\cos\theta i-1} \quad (14)$$

Comme les nombres d'onde ki peuvent incorporer le composé du champ magnétique B0 , il est nécessaire d'approcher ce composé d'une manière qui reflète la structure et la direction du champ magnétique autour de l'antenne. Pour un cas où l'induction du champ magnétique reste constante le long de l' axe Z de l'antenne, le paramètre B0 peut être formé comme suit :

$$B0 = \int_{0}^{2\pi} B0\ \text{maximum.}\ |\text{péché}\ \varphi\ |\ d\varphi = 4B0\ \text{max.} \quad (15)$$

Machine Translated by Google

où φ [rad] est l'angle situé dans le plan parallèle au plan de symétrie du dipôle. Si B0 ne reste pas constant le long du fil d'antenne et a une fonction de distribution connue avec la valeur maximale de B0 max. et l'argument de z, la formule se présente comme suit :

$$B0(z) = \int_0^{\frac{h}{2}} \int_0^{2\pi} B0\ max.(z)|\sin \varphi\ |\ d\varphi\ \ dz = 4 \int_0^{\frac{h}{2}} B0\ max.(z)\ dz \quad (16)$$

Les figures 42 à 45 présentent le coefficient w(f) (après intégration sur θ) calculé pour une large gamme de fréquences pour différentes concentrations d'électrons (comme dans les paragraphes précédents) et longueurs d'antenne ultérieures : 1, 10 et 100 m. Comme les formules (13) et (14) intègrent la formule (10), qui est essentiellement valable pour la gamme de fréquences du mode de propagation siffleur , la fréquence maximale dans ces figures ne dépasse pas la valeur de 1,4 MHz - le calcul au-delà de cette limite serait possible après la clarification de la précision de la formule (10) au-dessus de cette fréquence.

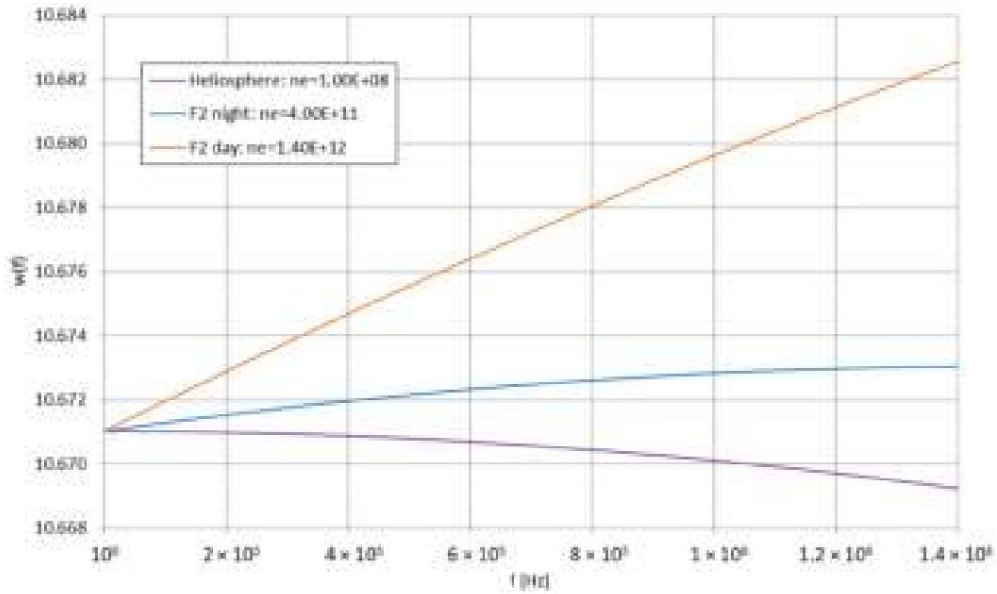


Figure 42. Paramètre de transformation w(f) calculé pour une longueur d'antenne h = 1 m.

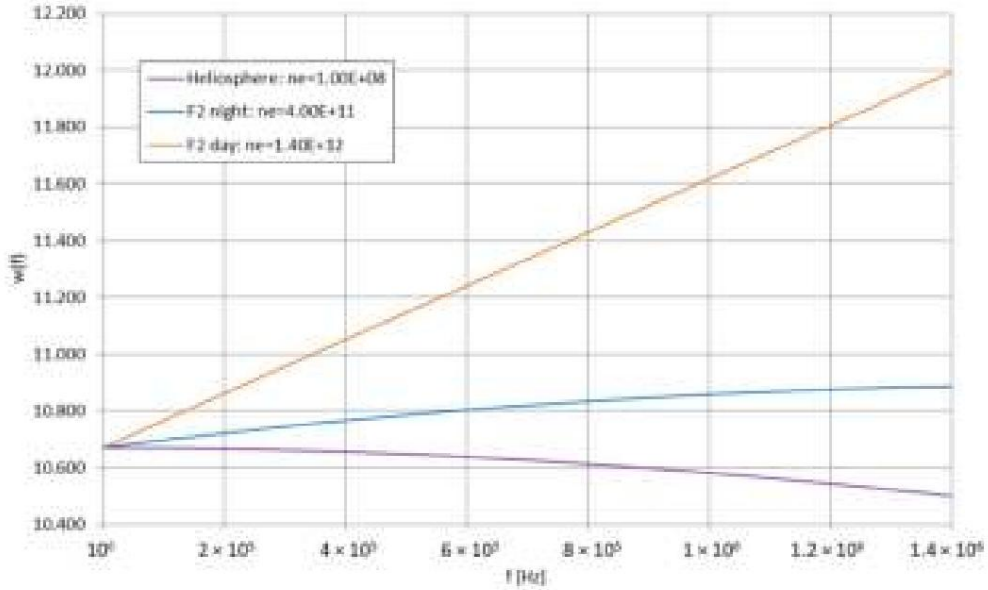


Figure 43. Paramètre de transformation w(f) calculé pour une longueur d'antenne h = 10 m.

Machine Translated by Google

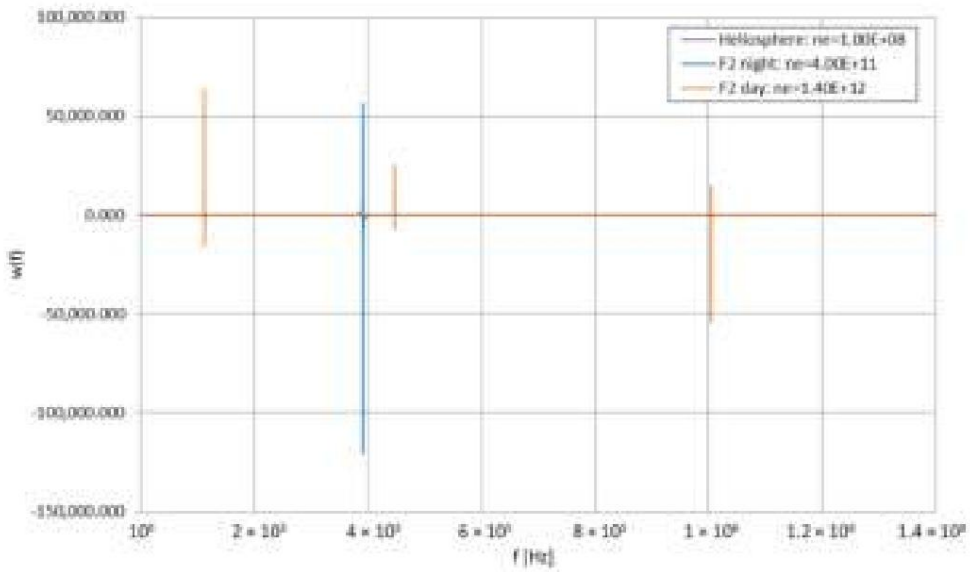


Figure 44. Paramètre de transformation w(f) calculé pour une longueur d'antenne h = 100 m.

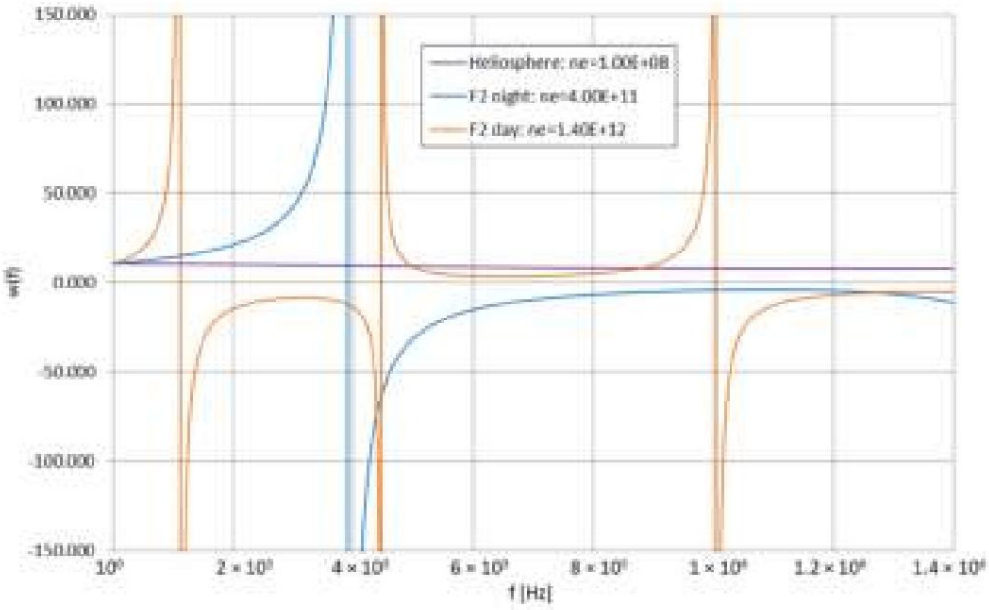


Figure 45. Paramètre de transformation w(f) calculé pour une longueur d'antenne h = 100 m — agrandi.

Pour les longueurs d'antenne plus petites, les coefficients calculés démontrent un comportement presque constant, légèrement croissant pour les fréquences plus élevées pour des conditions électroniques plus denses (couche F2 à la lumière du jour) et légèrement décroissant pour les conditions électroniques moins denses (héliosphérique). Pour la plus grande longueur d'antenne considérée de 100 m, le coefficient montre plusieurs changements significatifs dans les valeurs pour les conditions les plus denses en électrons, qui démontrent les différences entre les diagrammes de rayonnement de l'antenne pour les cas air/vide et plasmatique. Comme le coefficient est destiné à rapprocher le cas air/vide du cas plasmatique, il réagit sur l'apparition des lobes dans le motif, y compris sur tout changement de signe de la fonction, qui, d'un point de vue mathématique, peut apparaître .

6. Discussion

Les évolutions présentées des paramètres de base de l'antenne décrivant ses capacités à rayonner ou à recevoir de l'énergie électromagnétique montrent clairement la dépendance aux conditions électriques ou à l'espace environnant. Comme présenté, ces conditions n'influencent pas seulement l'impédance de l'antenne (comme le montrent divers précédents recherches des dernières décennie

Machine Translated by Google

mais son fonctionnement dans l'espace comme radiateurs d'énergie ou récepteurs d'énergie. Cela est important sous deux aspects majeurs : l'aspect de la conception du vaisseau spatial et de l'antenne et l'aspect de l'interprétation et de l'utilisation des données du vaisseau spatial existant et de son instrumentation.

L'aspect conception se concentre principalement sur l'affectation des antennes à proximité de l'engin spatial de manière à empêcher les mesures du plasma influencé directement par l'engin spatial (apparaissant autour de la structure de l' engin spatial - à moins qu'il ne s'agisse d'un problème). exigence spécifique à la mission). Cette influence directe peut être liée à la présence de structures conductrices (flèches/poutres, panneaux solaires, cadres d'engins spatiaux etc.) au sein des zones de Fresnel ou de Fraunhofer autour de l'antenne.

Les rayons des zones, calculés à l'aide des différentes formules du paragraphe 2, montrent clairement l'évolution avec l'évolution des paramètres du plasma : ils restent très sensibles aux différentes concentrations électroniques ne . Pour les antennes plus petites (~100 m de longueur), les rayons de toutes les zones sont relativement condensés ; il n'est donc pas difficile d'inclure dans les exigences de conception mécanique de l'instrumentation l'exigence de placer des structures plus grandes au-delà du rayon de la zone Fraunhofer (jusqu'à une fréquence maximale d'intérêt).
Avec l'augmentation de la longueur de l'antenne (~ 101 à 102 m), la précision (basée sur une formule)
La zone Fraunhofer devient trop grande pour être facilement incluse comme exigence dimensionnelle ; par conséquent, les rayons de la zone de Fresnel — ou la formule approximative du rayon de la zone Fraunhofer, dérivée des caractéristiques des champs EM autour de l'antenne — peuvent être pris en compte.

Dans le cas où l'engin spatial est déjà conçu, construit et opérationnel, ces rayons peuvent être utilisés comme indicateurs s'il serait avantageux de vérifier le diagramme de rayonnement/réception réel de l'antenne d'une manière qui inclut les éléments mécaniques de l'engin spatial comme réflecteurs d'antenne passifs. Ceci est particulièrement important pour la réception des signaux radio se propageant dans les modes d'onde Whistler et Alfvén, qui ont des rayons de zones Fraunhofer et Fresnel considérablement plus grands, allant jusqu'à la taille d'une constellation de satellites entière.

L'augmentation de la concentration électronique n'influence également le festonnage du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne ; pour les concentrations considérées les plus élevées, proportionnelles à celles de la couche ionosphérique F2 dans des conditions de lumière du jour (photoionisation, etc.), l'apparition de lobes de motif séparés (maximums et minimums) est présente aussi bien pour le mode de propagation siffleur aux fréquences plus basses (~ kHz et inférieures) et pour les fréquences élevées MHz. L'augmentation du festonnage est également directement liée à la proportion de la longueur d'onde du signal entrant par rapport à la longueur de l'antenne, qui se manifeste simultanément avec l'influence de la ne croissante .

Des lobes suffisamment proéminents doivent élever le paramètre de directivité, qui peut être utilisé - avec le paramètre d'efficacité de l'antenne - pour définir le gain de l'antenne, ou simplement pour décrire l'efficacité du rayonnement de réception de l'antenne à une fréquence donnée dans un plasma de paramètres donnés. . Les comportements de la directivité sont significativement différents pour chaque cas de mode de propagation et chaque valeur ne considérée . Cela nécessite une approche prudente pour un ensemble précis d'exigences de mesure, par exemple la plage de fréquences et les paramètres attendus du plasma. De manière générale, on peut remarquer que les antennes plus petites (longueur proportionnelle à 100 m) sont plus sujettes aux changements de directivité, en particulier pour les gammes de fréquences à haute fréquence MHz, de la même manière que le comportement festonné observé pour ces antennes. Pour des valeurs élevées de ne , le mode de propagation Whistler présente deux maximums de directivité globale, apparaissant dans chaque cas de longueur d'antenne considéré, qui sont inexistants dans l' environnement à faible teneur en électrons.

La figure 45 montre clairement les changements que l'environnement plasmatique produit dans les diagrammes de rayonnement/réception d'antenne pour de grandes ouvertures d'antenne (~ 102 m) - le coefficient présenté visant à transformer le diagramme air/vide en diagramme plasmatique reflète le diagramme plasmatique évolué , riche en maximums. et les minimums (des diagrammes de rayonnement plasmatique réels, montrant le rayonnement apparent le long de l'axe principal de l'antenne, peuvent être trouvés, par exemple, dans [35]). Cela prouve que les mesures au sol ne permettent pas de comprendre pleinement le fonctionnement de l'antenne dans un environnement spatial à concentration électronique importante.

Machine Translated by Google

La méthode proposée de transformation de motif permet cependant une description de base du comportement approximatif de l'antenne dans le plasma, ce qui sera utile pour l'analyse des données électromagnétiques spectrales des satellites existants - la définition, par exemple, de la direction de propagation du signal reçu. ou sa force réelle (en gardant à l'esprit la directivité et le festonnage variables de l'antenne).

7. Conclusions

Dans cet article, les paramètres de base de l'antenne liés à sa capacité à rayonner ou à recevoir de l'énergie électromagnétique sont présentés sous forme de variables dépendant des conditions simplifiées du plasma dans lequel l'antenne est immergée. Trois modes de propagation sont considérés (classique-ionosphérique, Whistler et Alfvén), ainsi que trois exemples de concentrations électroniques (couche F2 héliosphérique et ionosphérique généralisée : jour et nuit) et une induction de champ magnétique constant. Les paramètres d'antenne considérés sont les zones de rayonnement (inductive, Fresnel, Fraunhofer), le festonnage et la directivité.

Il est montré que ces paramètres évoluent intensément avec les conditions plasmatiques changeantes . Les zones de rayonnement restent condensées pour les antennes de plus petite taille et s'étendent considérablement pour les antennes de plus grande longueur, ce qui peut être considéré comme un inconvénient technique malgré l'augmentation de l'ouverture de l'antenne. De plus, pour les antennes plus grandes, les zones de Fresnel deviennent les plus grandes zones physiquement applicables. Le festonnage (nombre de lobes dans le diagramme de rayonnement) est augmenté à la fois par l'augmentation de la densité électronique et du rapport longueur d'onde de l'antenne.

Cet article propose également une méthode de transformation du diagramme de rayonnement/réception de l'antenne tel que mesuré au sol en celui qui serait attendu dans l'environnement du plasma spatial. Cette méthode s'avère efficace pour des longueurs d'antenne plus grandes (> 10 m), fournissant une transformation utile du diagramme de rayonnement de l'antenne de l'environnement air/vide (environnement de test) aux conditions plasmatiques attendues.

Les données présentées — sous forme de tracés pratiques pour différents paramètres et variables , ou sous forme de formules faciles à adapter aux cas individuels de plasma — complètent efficacement les travaux existants sur les impédances, les courants et les gaines des antennes plasmatiques et peuvent être utilisées pour l'évaluation réelle des performances des antennes des satellites de météorologie spatiale existants. Cela permettra une triangulation améliorée des signaux entrants enregistrés, ainsi que des exigences/contraintes supplémentaires pour la conception des instruments du nouveau satellite, ce qui sera utile, par exemple, pour éloigner l'équipement de mesure de l'influence directe du plasma apparaissant autour de lui. le vaisseau spatial lui-même.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les données sont disponibles sur demande.

Conflits d'intérêts : L'auteur ne déclare aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Vert, JL ; Inan, États-Unis Effets de la foudre sur les plasmas spatiaux et applications. En Physique des Plasmas Appliquée; Panneau de recherche ; Attrape, C., éd.; Société américaine de physique : College Park, MD, États-Unis, 2007.
2. Morozova, EA; Moguilevski, MM ; Hanasz, J. ; Rosanov, AA La structure fine du champ électromagnétique AKR telle que mesurée par le satellite Interball-2. Cosme. Rés. 2002, 40, 404-410. [Référence croisée]
3. Chuchra-Konrad, A. ; Matyjasiak, B. ; Schreiber, R. ; Rothkaehl, H. Une corrélation entre les émissions de type AKR et les émissions alignées sur le champ courants. Dans les actes de l'URSI GASS 2023, Sapporo, Japon, 19-26 août 2023.
4. Bresler, K. ; Zawił a, R. ; Ciarka, M. ; Chmyk, A. ; Mi's, TA; Mystkowski, R. ; Martyniak, J. ; Wiater, K. TOTORO Test Observations of Transient Objects and RadiO on board BEXUS 33. Dans les actes du 26e symposium ESA PAC sur les programmes européens de fusées et de ballons et la recherche connexe, Lucerne, Suisse, 19-23 mai 2024.
5. Gurnett, DA; Anderson, RR ; Écharpe, FL ; Fredricks, RW; Smith, EJ Résultats initiaux de l'enquête sur les ondes plasmatiques ISEE-1 et -2 . Science spatiale. Rév.1979 , 23, 103-122. [Référence croisée]
6. Gallet, RM; Helliwell, RA Origine des « émissions à très basse fréquence ». J. Natl. Bur. Stand.—D Radio Propag. 1959, 63D, 21-27. [Référence croisée]
7. Ferencz, C. ; Lichtenberger, J. ; Hamar, D. ; Ferencz, OE ; Steinbach, P. ; Székely, B. ; Perroquet, M. ; Lefeuvre, F. ; Berthelier, J.-J. ; Clilverd, M. Une signature VLF inhabituelle enregistrée par le satellite DEMETER. J. Géophys. Rés. 2010, 115, A02210. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

8. Siingh, D. ; Singh, AK ; Patel, RP ; Singh, R. ; Singh, RP ; Veenadhari, B. ; Mukherjee, M. Orages, éclairs, sprites et ondes radio magnétosphériques en mode siffleur. Survivre. Géophysique. 2008, 29, 499-551. [Référence croisée]
9. Xiao, F. ; Zhou, Q. ; Su, Z. ; Lui, Z. ; Yang, Z. ; Liu, S. ; Hé.; Gao, Z. Expliquer les occurrences de rayonnement kilométrique auroral à Van Allen ceintures de rayonnement. Géophysique. Rés. Lett. 2016, 43, 971-978. [Référence croisée]
10. Kishore, A. ; Déo, A. ; Kumar, S. Télédétection de la haute atmosphère à l'aide de Tweek et Whistler Sferics générés par la foudre ELF-VLF. Pac Sud. J. Nat. Appl. Sci. 2016, 34, 12-20. [Référence croisée]
11. Bł ˛ecki, J. Turbulence du plasma ULF/ELF associée à des structures à petite échelle à proximité de la magnétopause terrestre et choc d'arc. Dans Actes du 2e Symposium national PLASMA '95 « Recherche et applications des plasmas », Varsovie, Pologne, 26-28 juin 1995 ; Communications invitées ; 2ieme volume.
12. Mansilla, GA Effets ionosphériques d'une intense tempête géomagnétique. Goujon. Géophysique. Géode. 2007, 51, 563-574. [Référence croisée] 13. Sulic, DM ; Srečković, VA ; Mihajlov, AA Une étude des variations du signal VLF associées aux changements de niveau d'ionisation dans le Région D en raison des conditions solaires. Av. Espace Rés. 2016, 57, 1029-1043. [Référence croisée]
14. Thomson, NR; Clilverd, Massachusetts ; McRae, Paramètres de la région D ionosphérique nocturne WM de la phase et de l'amplitude VLF. J. Géophysique. Rés. Ambiance. 2007, 112. [Réf. croisée]
15. Zigman, V. ; Dominique, M. ; Grubor, D. ; Rodger, CJ; Clilverd, MA Densité électronique de la basse ionosphère et coefficients de recombinaison efficaces issus d'observations spatiales multi-instruments et de mesures VLF au sol lors d'éruptions solaires. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2023, 247, 106074. [Réf. croisée]
16. Jarvinen, R. ; Kallio, E. Modélisation hybride globale de la météo spatiale de Mercure et observations BepiColombo. Dans Actes du 4e URSI AT-RASC, Gran Canaria, Espagne, 19-24 mai 2024.
17. Mikhaïlov, YM ; Mikhaïlova, Géorgie ; Kapustina, fond électromagnétique OV ELF et VLF dans l'ionosphère externe au-dessus des régions sismoactives (satellite « INTERCOSMOS-24 »). Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Articles contribués ; Volume 1.
18. Klimov, S. ; Romanov, S. ; Savin, S. ; Nikolaïeva, N. ; Skalsky, A. ; Petrukovich, A. ; Nozdrachev, M. ; Triska, P. ; Amata, E. ; Ciobanu, M. ; et coll. Sonde de queue INTERBALL. Etude des limites du plasma magnétosphérique. Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Articles contribués ; Volume 1.
19. Bł ecki, J. ; Kosacki, K. ; Wronowski, R. ; 'Savin, S. ; Simunek, J. ; Smilauer, J. ; Juchniewicz, J. ; Klimov, S. ; Triska, P. Composantes électrostatiques et électromagnétiques de l'onde plasma observées dans la cuspide polaire à bord des satellites Prognoz-8 et Magion-4. Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Articles contribués ; Volume 1.
20. Bł ecki, J. ; Kosacki, K. ; Wronowski, R. ; Nemecek, Z. ; Safrankova, J. ; Simunek, J. ; Smilauer, J. ; Borodkova, N. ; Romanov, SA ; Savin, SP; et coll. Harmoniques électron-cyclotron observées par le sous-satellite Magion-4 dans la feuille de plasma. Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Articles contribués ; Volume 1.
21. Rothkaehl, H. ; Bł ecki, J. ; Kł os, Z. La signature du couplage ionosphérique-magnétosphérique étudiée avec le package d'ondes plasma PWP à bord du satellite CESAR. Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Articles contribués ; Volume 1.
22. Wooliscroft, LJC Mesures des ondes plasmatiques avec la mission ESA/NASA CLUSTER. Dans Actes du 2e Symposium national PLASMA '95 « Recherche et applications des plasmas », Varsovie, Pologne, 26-28 juin 1995 ; Communications invitées ; 2ieme volume.
23. McCollough, JP; Miyoshi, Y. ; Ginet, médecin généraliste ; Johnston, WR; Su, Y.-J. ; Starks, MJ ; Kasahara, Y. ; Kojima, H. ; Matsuda, S. ; Shinohara, moi; et coll. Transmission radio espace-espace à très basse fréquence dans la magnétosphère grâce aux satellites DSX et Arase. Terre Planètes Espace 2022, 74, 64. [CrossRef]
24. Lauben, D. ; Linscott, moi; Inan, U. L'instrument récepteur à large bande (BBR) pour les démonstrations et les expériences scientifiques (DSX) Vaisseau spatial; Rapport final n° AFRL-RV-PS-TR-2022-0114 ; Laboratoire de physique expérimentale Hanson, Université de Stanford : Stanford, CA, États-Unis, 15 décembre 2022.
25. Neuffer, A. ; Lunk, A. Diagnostic d'une source de pulvérisation magnétron planaire avec sondes Langmuir. Dans les actes du symposium international PLASMA '97 « Recherche et applications des plasmas », Jarnoł tówek près d'Opole, Pologne, 10-12 juin 1997 ; Communications invitées ; 2ieme volume.
26. Galejs, J. Impédance d'une antenne cylindrique à isolation finie dans un plasma froid avec un champ magnétique longitudinal. IEEETrans. Propag. d'antennes. 1966, 14, 727-736. [Référence croisée]
27. Galejs, J. Impédance d'une antenne isolée finie dans un plasma froid avec un champ magnétique perpendiculaire. IEEETrans. Propag. d'antennes . 1966, 14, 737-748. [Référence croisée]
28. Wunsch, DA Rayonnement d'une bande de courant électrique dans un milieu magnétoionique. Peut. J. Phys. 1967, 45, 1675-1691. [Référence croisée]
29. Bhat, B. Distribution du courant sur une antenne tubulaire infinie immergée dans un magnétoplasma collisionnel froid. Radio Sci. 1973, 8, 483-492. [Référence croisée]
30. Seshadri, SR Admission d'entrée d'une antenne cylindrique en milieu magnéto-ionique. J.Appl. Phys. 1968, 39, 2407-2412. [Référence croisée]
31. Chanson, P. ; Reinisch, BW; Paznukhov, V. ; Ventes, G. ; Cooke, D. ; Tu, J.-N. ; Huang, X. ; Bibl, K. ; Galkin, I. Interaction antenne-plasma haute tension dans la transmission des ondes sifflantes : effets de gaine de plasma. J. Géophys. Rés. 2007, 112, A03205. [Référence croisée]
32. Soloviev, OV Propagation des ondes radio à basse fréquence dans le guide d'ondes Terre-ionosphère perturbée par un triple rayonnement à grande échelle. irrégularité dimensionnelle. Radiophyse. Électron quantique. 1998, 41, 392-402. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

33. Attendez, théorie JR du rayonnement provenant de sources immergées dans un milieu anisotrope. J. Rés. Natl. Bur. Stand.—B. Mathématiques. Mathématiques. Phys. 1964, 68, 119-136. [Référence croisée]
34. Ginet, GP VLF Rayonnement de champ lointain provenant d'une antenne dipolaire linéaire immergée dans un plasma : modèle de base pour DSX ; Rapport n° 95-0002 ; Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology : Lexington, MA, États-Unis, 15 juin 2020.
35. Bannister, PR ; Harrison, JK ; Rupp, CC; Roi, RWP ; Cosmos, ML ; Lorenzini, CE; Dyer, CJ; Grossi, MD Émetteur et antenne orbitaux pour les communications spatiales ELF/VLF vers les sous-marins immergés. Dans Actes de la conférence AGARD Actes 529 : ELF/VLF/LF Radio Propagation and Systems Aspects, Symposium du Panel sur la propagation des ondes électromagnétiques, Bruxelles, Belgique, 28 septembre-2 octobre 1992.
36. Poisel, RA Systèmes d'antennes et applications de guerre électronique ; Maison Artech : Boston, MA, États-Unis ; Londres, Royaume-Uni, 2012.
37. Modelski, J. ; Jaszczyszyn, E. ; Chaci'nski, H. ; Majchrzak, P. Mesures des paramètres d'antenne ; OFPW, Université de Technologie de Varsovie : Varsovie, Pologne, 2004.
38. Bem, Antennes DJ et propagation des ondes radio ; WNT : Varsovie, Pologne, 1973.
39. Celi 'nski, Z. Plasma; PWN : Varsovie, Pologne, 1980.
40. Bogdanov, AF; Vasin, VV; Dulin, Virginie ; Ilin, Virginie ; Krivitskiy, BH ; Kouznetsov, Virginie ; Labutine, VK; Molochkov, YB; Piertsov, SV; Stiepanov, BM; et coll. Compendium sur la radioélectronique ; Kulikovskiy, AA, éd.; WKiŁ : Varsovie, Pologne, 1971.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Une tarification dynamique basée sur les ressources et un transfert forcé Algorithme d'incitation dans les réseaux socialement responsables

Xuemin Zhang 1,2, Yuan Li 1,2,*, Zenggang Xiong [1,2,*], Yan Chao Liu [1], Shihui Wang [2] et Delin Hou 1,2

1 École d'informatique et des sciences de l'information, Université d'ingénierie du Hubei, Xiaogan 432000, Chine ; zhxm9701@163.com (XZ); yanchaoliu@cuc.edu.cn (YL); hdl00@stu.hubu.edu.cn (DH)

2 École d'informatique et d'ingénierie de l'information, Université du Hubei, Wuhan 430062, Chine ; wsh@hubu.edu.cn

* Correspondance : 202221116012706@stu.hubu.edu.cn (YL) ; jkxxzg2003@163.com (ZX)

Résumé : Dans les réseaux socialement conscients, les nœuds se comportent généralement de manière égoïste en raison de contraintes de ressources. et les corrélations sociales, entraînant de faibles performances du réseau. Pour inciter les nœuds égoïstes à activement participer au transfert de messages, cet article propose une tarification dynamique basée sur les ressources et une tarification forcée algorithme d'incitation au transfert (DFIA). Tout d'abord, l'algorithme introduit la monnaie virtuelle comme moyen de transaction, puis conçoit une fonction de tarification basée sur des facteurs tels que l'état des ressources du nœud, contribution à la participation, pertinence de l'emplacement et connectivité sociale. Il veille à ce que l'expédition le service est négocié à un prix raisonnable selon des règles de négociation. Deuxièmement, un renvoi forcé Une stratégie est mise en œuvre pour contraindre les nœuds égoïstes, qui ne veulent pas participer aux activités des autres nœuds. le transfert de messages, pour transférer un certain nombre de messages non locaux. Pendant ce temps, afin de empêcher les nœuds de rejeter les messages et garantir un transfert réussi vers la destination, des règles spécifiques sont utilisées pour attribuer des valeurs de contribution aux nœuds qui participent avec succès au message expéditeur. Enfin, pour éviter les fausses cotations, la technologie blockchain est utilisée. Les informations sur les transactions sont regroupées en blocs et ajoutées à la blockchain après validation par consensus. par d'autres nœuds du réseau, garantissant la transparence et l'immuabilité des données de transaction. Les résultats de simulation indiquent que, comparé aux algorithmes d'incitation existants, cet algorithme ne améliore seulement la probabilité de livraison des messages, mais réduit également efficacement la latence moyenne.

Mots clés : réseautage socialement responsable ; nœuds égoïstes; fausse citation; monnaie virtuelle

check for updates

Citation : Zhang, X. ; Li, Y. ; Xiong, Z. ; Liu, Y. ; Wang, S. ; Hou, D.A. Tarification dynamique basée sur les ressources et Incitation au transfert forcé Algorithme en conscience sociale La mise en réseau. Électronique 2024, 13, 3044. https://doi.org/10.3390/électronique13153044

Rédacteur académique : Domenico Rosaci

Reçu : 25 juin 2024
Révisé : 23 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Avec le développement rapide des technologies de l'information en réseau, l'environnement mobile formé par les appareils intelligents (smartphones, tablettes, appareils embarqués) à l'aide de les technologies sans fil basées sur le quartier (Bluetooth, WIFI) [1] ont reçu de plus en plus plus d'attention, et le Socially Aware Networking (SAN) [2,3] est apparu en conséquence. SAN la recherche détermine des protocoles raisonnables pour fournir des services aux applications de couche supérieure en détectant et en analysant les informations contextuelles du nœud mobile [4] dans le réseau. Ceci est réalisé grâce à l'analyse des réseaux sociaux et aux technologies d'apprentissage automatique, qui analyser et apprendre du comportement et des informations environnementales des transporteurs obtenus à partir d'appareils mobiles intelligents. À partir de ces données, des attributs sociaux tels que la communauté, l'intensité des interactions et les modèles de mobilité sont dérivés. En intégrant ces attributs sociaux avec un comportement de transporteur, des protocoles de routage efficaces et des stratégies de transfert de messages sont conçus pour fournir des services de haute qualité pour les applications de couche supérieure. Par exemple, les études dans [5,6] ont pris des décisions de transfert basées sur les caractéristiques sociales des utilisateurs et similitudes [7].

SAN (voir Figure 1) exploite les attributs sociaux des opérateurs mobiles (c'est-à-dire les abonnés) pour concevoir des protocoles réseau efficaces. Cela représente une nouvelle approche dans Delay Réseau tolérant (DTN) [8] et réseau opportuniste (OppNet) [9]. En termes de principe de fonctionnement, SAN est similaire à DTN et OppNet [10]. D'une part, en raison du

Machine Translated by Google

topologie dynamique causée par la mobilité des nœuds au sein du réseau, il existe un manque de chemins de communication stables de bout en bout entre les nœuds source et de destination. Lorsque la liaison entre les nœuds est interrompue, les méthodes de routage conventionnelles ne parviennent pas à transmettre les données des messages, et des rencontres probabilistes sont souvent utilisées pour réaliser la transmission de manière multi-sauts. D'un autre côté, lors du transfert de messages, les nœuds intermédiaires utilisent généralement la méthode « store-carry-forward » pour stocker temporairement les messages [11-13], en utilisant leurs appareils à courte portée et à faible coût pour communiquer entre eux, partageant ainsi objets de données (tels que des images, des publicités, etc.) entre les nœuds [7]. Cependant, contrairement à DTN et OppNet, les appareils mobiles dans SAN sont généralement transportés par des objets tels que des humains, des véhicules et des animaux, qui se déplacent vers différents endroits et se livrent à différentes activités, ce qui entraîne une topologie de réseau en constante évolution. Par conséquent, il existe certains attributs sociaux parmi les nœuds du SAN. Il est extrêmement crucial de développer des solutions efficaces pour motiver les nœuds à coopérer grâce à ces caractéristiques d'attributs sociaux.

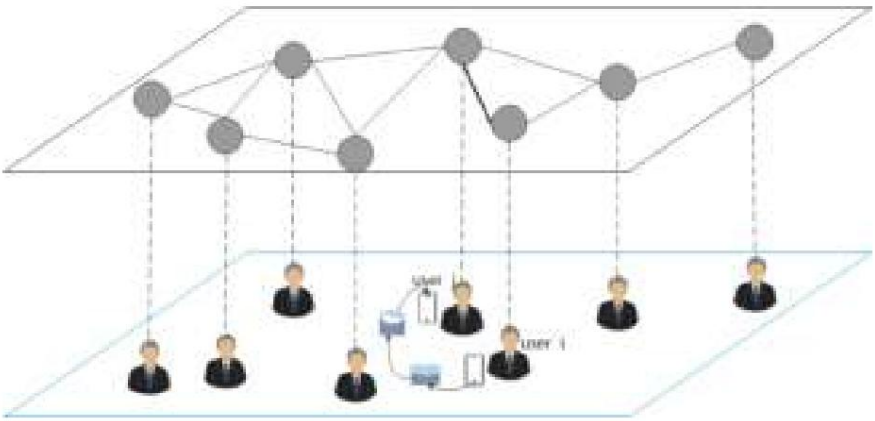


Figure 1. Réseautage socialement responsable.

En tant que modèle de réseau émergent, le SAN doit encore relever de nombreux défis en matière de recherche sur l'égoïsme des nœuds, les problèmes de sécurité du transfert de messages et d'autres technologies connexes . Dans SAN, certains nœuds peuvent présenter des comportements égoïstes en raison de leurs ressources limitées, ce qui entraîne une faible capacité de livraison ou de mauvaises relations sociales avec d'autres nœuds. Ces comportements ont un impact négatif sur les performances et l'efficacité globales du réseau. Les comportements égoïstes des nœuds se manifestent par un égoïsme individuel [14] et un égoïsme social [15]. Les nœuds faisant preuve d'égoïsme individuel ne reçoivent ni ne transmettent d'informations à d'autres nœuds lorsque leurs ressources sont rares. À l'inverse, les nœuds affichant un égoïsme social ne fournissent des services de transfert de données qu'à des nœuds familiers et refusent de transmettre ou de recevoir des messages de données provenant de nœuds ayant de mauvaises relations sociales. Dans le SAN, en plus des défis posés par l'égoïsme des nœuds, il existe également des risques d'attaques malveillantes telles que la falsification et le vol des messages transférés et des enregistrements de transactions [16]. Il est donc clair que des mécanismes d'incitation efficaces et des mesures de sécurité strictes sont nécessaires pour motiver les nœuds à participer à la coopération et empêcher les attaques malveillantes de se produire, ce qui, à son tour, garantit un fonctionnement efficace du SAN et une transmission sécurisée des données.

Actuellement, la conception de mécanismes d'incitation pour les nœuds est la principale méthode pour résoudre le problème de l'égoïsme des nœuds dans les SAN. Les mécanismes d'incitation à la coopération entre nœuds existants peuvent être classés en trois types : les mécanismes d'incitation basés sur la réputation, les mécanismes d'incitation basés sur la monnaie virtuelle et les mécanismes d'incitation basés sur la théorie des jeux.

Comme décrit dans l'article [17], les auteurs ont calculé avec précision la réputation en combinant la crédibilité et la confiance des recommandataires et ont évalué équitablement chaque recommandation. Ils ont utilisé un mécanisme de service différentiel équitable pour encourager la participation active.
Dans [18], Roy et al. valeur de réputation de nœud définie et coût de transfert de message. Cette stratégie améliore l'efficacité de la transmission des messages en sélectionnant des nœuds ayant une valeur de réputation élevée et un faible coût de transmission de données multidiffusion en tant que nœuds du prochain saut pour le transfert des messages. Bounouni et coll. [19] combinent la réputation directe et indirecte pour évaluer la fiabilité du nœud.

Machine Translated by Google

ness, permettant aux nœuds de comprendre avec précision l'état des nœuds voisins dans leur voisinage. Ensuite, les nœuds sont classés en différents états coopératifs en fonction de leurs valeurs de réputation, et les incitations correspondantes sont mises en œuvre pour encourager la coopération basée sur ces états. Ces mécanismes d'incitation sont confrontés à des difficultés de surveillance, de stockage et de transmission des valeurs de réputation en raison d'attaques potentielles de nœuds malveillants, ce qui peut entraîner des incohérences dans les valeurs de réputation. De plus, les nœuds proches du seuil défini peuvent faire preuve d'une mentalité de hasard, conservant juste assez de valeur de réputation pour éviter de participer activement au transfert.

Wang et coll. [20] ont proposé un modèle de jeu évolutif incitatif, qui encourageait les nœuds normaux et anormaux à participer à la coopération du réseau à travers le processus évolutif de survie du plus fort, garantissant un niveau élevé de coopération et maintenant la stabilité continue du réseau. Un modèle de jeu répétitif (CGTFT) basé sur la fonction d'évaluation de la coopération des nœuds voisins a été établi dans la littérature [21]. Pour les nœuds rationnels du réseau, la fonction d'évaluation du degré de coopération est conçue en combinant l'énergie résiduelle et le taux de transfert réussi des nœuds. Ensuite, le modèle CGTFT est utilisé pour le jeu, récompensant les nœuds qui participent activement à la coopération et punissant les nœuds égoïstes et non coopératifs. De plus, un facteur d'oubli est introduit pour faciliter la reconstruction de la coopération pour les nœuds qui entrent dans la période de punition. L'étude rapportée dans [22,23] a proposé un modèle de tarification théorique du jeu basé sur le modèle Rubinstein Bargain, permettant aux nœuds relais de tarifer leurs services en fonction de l'énergie résiduelle et de la valeur des informations transmises, améliorant ainsi la distribution du contenu des messages au sein de l'entreprise. le réseau. Ces mécanismes utilisent la théorie des jeux pour l'analyse. Cependant, ils nécessitent des coûts de ressources élevés et conviennent mieux aux réseaux symétriques, ce qui les rend moins conviviaux pour les réseaux asymétriques.

Xiao et coll. [24] ont proposé un système d'incitation au transfert de données basé sur un échange équivalent (EEIS). EEIS combine l'état des ressources et l'état de richesse des nœuds pour évaluer les messages qui doivent être transmis et divulguer publiquement l'état de richesse et de ressources des deux parties commerciales. Dans [25], Li et al. introduit un algorithme d'incitation en deux étapes (STIA) basé sur la tarification des services. STIA évalue le service de transfert en tenant compte de la qualité du service, des attributs des messages et de l'état des ressources, et les auteurs ont proposé un mécanisme d'incitation en deux étapes. Il formule également un système de découvert monétaire et un mécanisme de pénalité en deux étapes pour empêcher les nœuds de faire défaut après un découvert de devises. Pendant la transaction de service, les deux nœuds accèdent à un centre de compensation de crédit (CCC) pour comprendre la situation de chacun, évitant ainsi les fausses cotations. Cependant, le recours à une institution tierce de confiance pour gérer et empêcher les fausses cotations augmente le risque de fuite de données en cas de failles de sécurité ou d'attaques malveillantes. Rao et coll. [26] ont proposé un algorithme d'incitation socialement égoïste (RSIA) aux ressources limitées. Les nœuds sont récompensés par des monnaies virtuelles par le biais de négociations et de négociations pour inciter les nœuds égoïstes à faire partie de la coopération. L'algorithme introduit le coefficient de Gini pour évaluer le solde des revenus des nœuds, et récompense ou pénalise les nœuds en fonction de leur solde de revenus. RSIA configure chaque nœud du réseau avec un module de sécurité approuvé. Les nœuds n'ajoutent la valeur monétaire correspondante que lorsque les informations de transaction sont vérifiées comme étant non modifiées, évitant ainsi les fausses cotations. Cependant, cet algorithme ne prend pas en compte la relation de position entre les nœuds. Lors de la configuration du module de sécurité H pour que les nœuds effectuent la validation ACK , le recours aux fabricants pour la confiance des nœuds pourrait compromettre la sécurité de l'ensemble du réseau si la crédibilité d'un fabricant était compromise. Par conséquent, garantir l'authenticité et l'exactitude des transactions et empêcher les fausses cotations restent des problèmes critiques à résoudre.

En résumé, concernant l'analyse ci-dessus, pour inciter les nœuds égoïstes à participer activement au transfert de messages et empêcher les nœuds de faire de fausses cotations, cet article propose une tarification dynamique basée sur les ressources et un algorithme d'incitation au transfert forcé (DFIA). Cet algorithme analyse le comportement égoïste des nœuds et prend en compte leur situation en matière de ressources, leur niveau de contribution, leur statut patrimonial et leur pertinence sociale pour négocier les prix de transmission des messages. De plus, une stratégie de transfert forcé est introduite pour contraindre

Machine Translated by Google

des nœuds égoïstes pour transmettre des messages non locaux, limitant ainsi le comportement des nœuds qui se concentrent uniquement sur leurs propres intérêts et ne souhaitent pas participer à la coopération en réseau. Pour éviter les fausses cotations, les informations sur les transactions sont enregistrées sur la blockchain, tirant parti de la nature décentralisée et transparente de la technologie blockchain pour garantir que les prix ne peuvent pas être falsifiés.

Le reste de cet article est structuré comme suit : La section 2 présente le modèle de réseau et les hypothèses de l'algorithme. La section 3 détaille les définitions pertinentes et le processus de mise en œuvre de l'algorithme proposé. La section 4 présente l' environnement de simulation. Nous définissons Spray And Wait [27] comme algorithme de routage sous-jacent et combinons le DFIA proposé, le RSIA de l'article [26], le STIA de l'article [25] et l'EEIS de l'article [24] avec l'algorithme de routage sous-jacent pour une comparaison expérimentale. . La dernière partie résume l'ensemble du document et les perspectives d'avenir.

2. Modèle de réseau et hypothèses

Cet article présente une représentation abstraite des connexions entre les nœuds dans les réseaux socialement conscients (SAN) sous la forme d'un graphe non orienté G(D, E), où D est l'ensemble de tous les nœuds et E représente l'ensemble des arêtes. Ici, N désigne le nombre de nœuds dans SAN.
Le nœud source est le porteur du message avant transmission, et le nœud relais est le porteur qui reçoit le message. Lors de la rencontre du nœud source et du nœud relais, la formation d'une bordure entre les nœuds est initiée. E(i, j) représente l'arête entre les nœuds i et j, où i = j.

De plus, au stade initial de la simulation du réseau, cet article crée un bloc de genèse. Au fur et à mesure que les transactions pour les services de transfert de messages entre les nœuds sont terminées avec succès, les nouveaux enregistrements de transactions sont regroupés dans de nouveaux blocs et liés séquentiellement après le bloc de genèse. Cela garantit que tous les enregistrements de transactions sont stockés de manière sécurisée et ordonnée dans la blockchain formée à partir du bloc Genesis. Les nœuds du réseau participent et maintiennent collectivement une blockchain publique, transparente et inviolable.

Selon les besoins, ce document fait les hypothèses et définitions suivantes pour le modèle :

1. Chaque nœud du réseau possède un et un seul identifiant, et tous les nœuds sont rationnels, ce qui signifie qu'ils poursuivent la maximisation de leurs avantages économiques ou d'autres objectifs stratégiques tout en adhérant aux protocoles et aux règles du réseau.
2. Le réseau comprend deux types distincts de nœuds : les nœuds normaux et les nœuds égoïstes. Les nœuds normaux participent au stockage, au transport et au transfert des messages comme prévu ; les nœuds égoïstes sont ces nœuds qui refusent d'accepter et de transmettre des messages provenant d'autres nœuds en raison de faibles avantages ou de faibles connexions sociales.
3. Supposons que le comportement malveillant potentiel des nœuds du SAN se limite à de fausses citations, plutôt qu'à une falsification des messages ou à une collusion.
4. Un seul nœud du réseau est autorisé à former un nouveau bloc à un moment donné.

3. Un algorithme d'incitation à la tarification dynamique et au transfert forcé basé sur les ressources

Dans cet article, la transmission de messages entre nœuds est traitée comme une transaction. L'acheteur est le transporteur du message avant l'expédition et le vendeur est le transporteur qui reçoit le message. Le service de transfert fourni par l'acheteur est la marchandise et les deux parties utilisent la monnaie virtuelle comme support de transaction. Les deux parties proposent un prix initial basé sur une fonction de tarification. Si l'offre est raisonnable, la transaction est réussie.
Dans le cas contraire, les prix sont ajustés selon des règles de négociation spécifiques et la transaction est retentée. Si la transaction échoue toujours, le message suivant est traité. Une fois la transaction réussie, les informations sur la transaction sont écrites dans un bloc et liées à la blockchain, garantissant ainsi la transparence et l'immuabilité des informations.

Machine Translated by Google

3.1. Définitions pertinentes

3.1.1. Urgence de livraison des nœuds

L'urgence de livraison d'un nœud fait référence à l'urgence avec laquelle un nœud peut recevoir et transmettre des messages, principalement déterminée par l'espace tampon restant du nœud, l'énergie restante et la durée de vie (TTL) restante du message. Lorsque les trois sont suffisants, cela indique que l'urgence de livraison du nœud est faible et que le nœud dispose de suffisamment de ressources et de temps pour transférer et recevoir des messages. À mesure que les messages sont continuellement reçus et transmis, l'espace tampon du nœud, son énergie et la durée de vie du message diminueront inévitablement progressivement, augmentant ainsi l'urgence de livraison du nœud. Dans cet article, nous utilisons un index d'état pour représenter cette urgence de livraison d'un nœud.

L'indice d'état de la mémoire tampon du nœud est le rapport entre l'espace tampon restant du nœud à un moment donné et l'espace tampon total initial du nœud, reflétant la capacité de mise en mémoire tampon du nœud. L'indice d'état énergétique du nœud est le rapport entre l'énergie restante du nœud à un moment donné et l'énergie totale initiale du nœud, reflétant la capacité du nœud à transmettre des messages. L' indice TTL du message est le rapport entre la durée de vie restante du message à un moment donné et la durée de vie initiale du message, qui est l'un des facteurs critiques affectant la capacité du nœud à transmettre le message. Par conséquent, l'urgence de livraison Qh du nœud x à l'instant h est définie comme suit :

$$Q^{h}_{x,m} \ (1 -). \qquad \frac{\text{Brx Erx Trm} = \alpha \quad (1 -) + \beta \quad (1 -) + \gamma}{\text{Binitx Einitx Tinitm Les valeurs de pondération } \alpha, \beta} \qquad (1)$$

et γ sont introduites pour équilibrer différents objectifs d'optimisation. Puisque le problème impliqué est NP-Hard, les valeurs de poids entre les différentes instances auront un impact significatif sur les performances de l'algorithme. Par conséquent, dans notre étude, nous avons ajusté différentes valeurs de poids au moyen d'un grand nombre d'expériences, puis avons trouvé la configuration de poids optimale pour une instance de problème spécifique. Brx , Erx et Trm représentent respectivement l'espace tampon restant, la valeur d'énergie restante et le TTL restant du message m du nœud x à l'instant h. Binitx , Einitx et Tinitm représentent respectivement l'espace tampon total initial, la valeur d'énergie totale initiale et la durée de vie initiale du message m pour le nœud x.

3.1.2. Pertinence positionnelle des nœuds

La pertinence positionnelle des nœuds fait référence à la situation liée à la distance entre le nœud et le nœud de destination du message. Il est normalisé à l'aide d'une fonction de similarité gaussienne sur la fonction d'attribut de position du nœud, servant de mesure des attributs de position du nœud.

Les principaux attributs de localisation d'un nœud incluent la vitesse de déplacement du nœud, l' angle avec le nœud de destination et la distance. La fonction d'attribut de localisation loc(x, d) d'un nœud est défini comme

$$\text{loc}(x, d) = \frac{vx \quad |\cos A|}{\text{ré}(x,d)}, \qquad (2)$$

où vx désigne la vitesse de déplacement du nœud x. Supposons que les coordonnées du nœud x et du nœud de destination d soient respectivement (ax,bx) et (ad ,bd). Alors, cosA = $\frac{ax \quad ad+bx \quad bd}{\sqrt{2 x+bx^2} \ \text{une} d+b^2 d}$.

où 0 ≤ A ≤ π, et A représente l'angle entre le nœud x et le nœud de destination. D(x, d) = $(ax - ad)^2 + (bx - bd)^2$, où D(x, d) représente la distance euclidienne entre le nœud x et le nœud de destination.

La fonction de similarité gaussienne [28] est utilisée pour normaliser l'équation (2), et la pertinence de position des nœuds est calculée comme suit :

$$g(x) = e^{\frac{-(\text{loc}(x,d))^2}{2\sigma^2}}, \qquad (3)$$

où σ = 1 est le paramètre d'échelle. À mesure que la fonction d'attribut de localisation du nœud x diminue, la valeur de g(x) se rapproche de 1, indiquant que le temps nécessaire au nœud x pour atteindre la destination

Machine Translated by Google

le nœud est plus court. Dans le modèle de tarification, le nœud x sera prêt à payer un prix plus élevé pour que le service de transfert transmette rapidement le message.

3.1.3. Contribution de participation des nœuds

Dans un réseau, la contribution de participation d'un nœud reflète son niveau d'implication dans la transmission des messages et sa contribution à l'efficacité globale du réseau. Il s'agit d'un facteur important influençant le prix d'un nœud. Une contribution de participation plus élevée indique la volonté d'un nœud de fournir des services à d'autres nœuds, augmentant ainsi le taux de livraison des messages au sein du réseau grâce à ses activités de transfert. Par conséquent, l'algorithme DFIA introduit le degré de coopération et le degré de contribution moyen des nœuds pour mesurer leur contribution à la participation au cours du processus de livraison du message.

La volonté d'un nœud de coopérer est démontrée par sa volonté de consommer ses ressources pour transmettre les messages générés par d'autres nœuds. Le nombre de messages non locaux transmis par un nœud est directement proportionnel à sa participation. Ainsi, le degré de coopération Xx(h) du nœud x au temps h est défini comme

$$Xx(h) = \frac{\text{Effets}}{MX}. \quad (4)$$

où Fx désigne le nombre total de messages non locaux transmis par le nœud x. Chaque fois que le nœud x transmet avec succès un message non local, alors Fx + 1. Mx représente le nombre de rencontres que le nœud x a avec d'autres nœuds. Chaque fois que le nœud x rencontre un autre nœud : le Mx + 1.

Lorsque le message qu'un nœud aide à transmettre est transmis avec succès au nœud de destination, cet article attribue des valeurs de contribution en fonction du nœud en fonction de sa position dans le chemin de transfert pour encourager la participation active à la communication réseau. Le premier nœud relais du chemin de transfert se voit attribuer la valeur de contribution la plus élevée, car il détermine la direction de livraison du message. De plus, le dernier nœud relais reçoit une valeur de contribution relativement importante car il achève la livraison réelle du message et est l'exécuteur de la tâche. Les autres nœuds relais dans le chemin de transfert reçoivent des valeurs de contribution décroissantes en fonction de leurs positions dans le chemin de transfert. La valeur de contribution C(i, n) attribuée par le nœud i sur le nième chemin est représentée comme suit :

$$C(je, n) = \begin{cases} (1 - r)^{je-1} & r, \text{ si } 0 \le je < L \\ (1 - r)^{je-1}, & \text{si } je = L \end{cases}, \quad (5)$$

$$moyCx = \frac{\sum_{t=1}^{n} Ct(x, n)\, t}{}, \quad (6)$$

où r (0 < r < 1) désigne le facteur de ratio d'allocation de valeur de contribution, et L représente le nombre total de nœuds relais sur le chemin. Lors de la livraison réussie d'un message au nœud de destination, la valeur de contribution du nœud x est accumulée conformément au schéma d'allocation susmentionné. Par la suite, la valeur de contribution moyenne du nœud x, avgCx , est calculée selon l'équation (6).

Par conséquent, la contribution de participation PCx du nœud x peut être exprimée par les équations (5) et (6) comme

$$PCx(h) = \rho \quad Xx(h) + (1 - \rho) \quad avgCx, \quad (7)$$

où ρ est le facteur de pondération par lequel Xx(h) et avgCx ont une influence sur PCx et ρ [0, 1].

3.1.4. Statut de richesse des nœuds

Les nœuds du réseau possèdent initialement une quantité spécifique de monnaie virtuelle, qui reflète dans une certaine mesure leur capacité de transfert. En fonction de la quantité de monnaie virtuelle disponible pour un nœud, celle-ci peut être classée en trois états de monnaie virtuelle différents : état suffisant, état général et état insuffisant. Lorsque Vx(h) > Vmax, le nœud est dans un état suffisant

Machine Translated by Google

état de richesse, instant Cx(h) > 1. Lorsque Vx(h) < Vmin, le nœud est dans un état de richesse insuffisant, instant Cx(h) < 1. Lorsque Vmin ≤ Vx(h) ≤ Vmax, le nœud est dans un état de richesse général, auquel instant Cx(h) = 1. Le calcul pertinent est le suivant :

$$Cx(h) = \begin{cases} \frac{Vx(h)}{Vmax}, \text{État adéquat } 1, \\ \text{Etat général} \\ \frac{Vx(h)}{Vmin}, \text{état inadéquat} \end{cases}. \quad (8)$$

où Vx(h) représente la quantité de monnaie virtuelle détenue par le nœud x à l'instant h.
Les seuils de monnaie virtuelle Vmax et Vmin, respectivement, représentent les montants maximum et minimum de monnaie virtuelle pouvant appartenir à un nœud.

3.1.5. Degré de corrélation sociale entre les nœuds

Dans SAN, les corrélations sociales entre les nœuds décrivent dans quelle mesure une sorte de connexion ou d'influence mutuelle existe entre les nœuds. La corrélation sociale est utilisée pour refléter l'interaction et les liens entre les nœuds du réseau en analysant les voisins communs et les enregistrements de rencontres historiques entre les nœuds. Par conséquent, cet article évalue de manière exhaustive la corrélation sociale entre les nœuds à partir des dimensions du chevauchement social des nœuds et du degré de contact entre les nœuds.

Le degré de chevauchement entre deux nœuds est quantifié par le nombre de voisins communs qu'ils possèdent dans le SAN. Ces nœuds voisins communs constituent le pont reliant deux nœuds et représentent la similarité entre les nœuds. Ainsi, le chevauchement social entre le nœud x et le nœud y est défini comme

$$\text{chevauchementxy} = \frac{\text{comxy}}{\text{voisinx} + \text{voisin} - \text{comxy}}, \quad (9)$$

où comxy désigne le nombre de nœuds voisins communs entre les nœuds x et y ; neighx et neighy représentent respectivement le nombre total de voisins des nœuds x et y.

Le degré de contact entre nœuds quantifie l'intimité du contact entre ces nœuds à travers l'analyse de la fréquence et de la durée des rencontres. Si deux nœuds communiquent fréquemment, interagissent fréquemment et profondément, et que le degré de contact entre eux est élevé, alors, en s'appuyant sur la définition d'un ami dans la société réelle, les deux nœuds sont amis l'un avec l'autre. Le degré de contact contactxy entre les nœuds x et y est calculé comme suit :

$$\text{contactxy} = \frac{\text{Nmcxy}}{\text{N}} \frac{\text{Tmxy}}{\text{actuelT}}. \quad (10)$$

Comme mentionné ci-dessus, Nmcxy désigne le nombre de rencontres entre les nœuds x et y jusqu'à présent, Tmxy désigne la somme de tous les temps de rencontre entre les nœuds x et y jusqu'à présent, N désigne le nombre de nœuds dans le réseau actuel et accurentT représente le nombre actuel de nœuds. moment.

Sur la base des équations (9) et (10), la corrélation sociale SCxy entre les nœuds est calculée comme suit:

$$\text{SCxy} = \text{chevauchementxy} + (1 -) \quad (11)$$

contactxy, où est le facteur de pondération qui détermine l'influence de chevauchement et de contactxy sur SCxy, et [0, 1].

3.2. Modèle de transaction

Dans SAN, le transfert de messages entre les nœuds rencontrés est résumé comme un processus de transaction, dans lequel le service de transfert est négocié et échangé à l'aide de monnaie virtuelle. Dans ce processus, le nœud transportant le message avant le transfert agit en tant qu'acheteur, tandis que le nœud recevant le message agit en tant que vendeur et le service de transfert de message agit en tant que

Machine Translated by Google

la commodité. Les deux parties sont tenues de divulguer leur richesse et leurs ressources ainsi que leurs offres de service d'expédition en fonction de leurs considérations respectives.

3.2.1. Fonction de dépense de l'acheteur

Pour garantir que le message puisse être livré sans problème au nœud du prochain saut, l'acheteur x doit prendre en compte sa propre réserve de richesse, son urgence de livraison et les attributs du message transporté, afin de déterminer un prix de dépense raisonnable comme compensation pour la transmission . services au nœud du saut suivant. Lorsque la réserve de richesse de x est suffisante, l'acheteur synthétisera sa propre urgence de livraison et sa réserve de richesse pour proposer un prix raisonnable.
Lorsque la réserve de richesse de x est insuffisante, avec le temps, la durée de survie du message sera progressivement raccourcie, le cache et l'énergie restants du nœud seront progressivement épuisés et l'urgence de livraison de l'acheteur deviendra plus élevée. Ainsi, pour soulager sa pression, l'acheteur proposera un prix de transaction plus élevé. Lorsque la contribution de participation de x est plus élevée, ce qui indique une meilleure performance du service, cela bénéficiera à x dans l'achat du service de transfert. Si le nœud transporte un message plus volumineux, l'énergie et le cache consommés lors du transfert augmenteront également, et l'urgence de livraison de x augmentera également et, à son tour, affectera le prix de l'offre pour le message. De plus, x doit considérer sa propre corrélation de position de nœud. Lorsque sa corrélation de position au nœud de destination du message est élevée, cela signifie que le temps nécessaire à x pour atteindre le nœud de destination est plus court, et le prix augmentera légèrement afin de transmettre le message le plus rapidement possible. En résumé, la fonction de dépense de l'acheteur x pour transmettre le message m au moment h est définie comme

$$BNpx(h) = Mtaille \quad (Q + \sigma 1^{h} \quad g(x)) \quad Cx(h) \quad PCx(h). \ (x,m) \tag{12}$$

où Msize désigne la taille de m, g(x) désigne la pertinence positionnelle de x, σ1 est le poids occupé par la pertinence positionnelle d'un nœud et satisfait α + β + γ + σ1 = 1, Cx(h) désigne la richesse de x au temps h, et PCx(h) désigne la contribution de participation du nœud x au temps h.

3.2.2. Fonction de revenu du vendeur

Lorsqu'il reçoit des messages véhiculés par x, le vendeur y doit également tenir compte de sa propre réserve de richesse, de l'urgence de livraison et des attributs du message véhiculé pour en fixer le prix, dans le but de maximiser ses revenus. Lorsque la réserve de richesse de y est suffisante, la volonté du nœud de fournir le transfert de messages diminuera, il doit donc se combiner avec l'urgence de livraison de y pour établir une tarification raisonnable. Lorsque la réserve de richesse de y est insuffisante, il doit obtenir de la monnaie virtuelle ailleurs à un prix inférieur, et sa volonté de transmettre des messages augmente. La transmission des messages est plus favorable lorsque y a une contribution de participation plus élevée. La taille du message est directement proportionnelle à l'énergie et au cache requis pour le transfert du message ; Lorsque le message est plus volumineux, la consommation d'énergie et de cache augmente également pour la fourniture d'un service de transfert, ce qui, à son tour, affecte la tarification. De plus, y doit prendre en compte la corrélation sociale entre Si la corrélation entre les nœuds est élevée, c'est-à-dire SCxy ≥ SCxymin, cela indique que la relation entre deux nœuds est meilleure. Le nœud y est plus disposé à transmettre le message et le prix de l'offre sera relativement bas, comme le montre l'équation (13). Au contraire, si la corrélation entre les nœuds est faible, c'est-à-dire SCxy < SCxymin, le nœud de transfert fera une offre relativement élevée, comme le montre l'équation (14).

$$SNpy(h) = Msize \quad (Q - \sigma 2^{h} \quad (1 - SCxy)) \quad (1 - PCy(h))^{\frac{1}{Cy(h)}}, \ (y,m) \tag{13}$$

$$SNpy(h) = Mtaille \quad (Q_{(y,m)}^{h} \quad + \sigma 2 \quad SCxy) \quad \frac{1}{Cy(h)} (1 - PCy(h)). \tag{14}$$

où Msize désigne la taille de m, SCxy désigne la corrélation sociale entre x et y, et σ2 désigne la valeur de poids occupée par la corrélation sociale entre x et y, satisfaisant

Machine Translated by Google

α + β + γ + σ2 = 1. SCxymin désigne le seuil minimum de corrélation sociale entre x et y, Cy(h) désigne le statut patrimonial de y au moment h et PCy(h) désigne la contribution de participation de y au moment h.

3.2.3. Stratégie de transfert forcé Compte

tenu de l'énergie et des ressources de cache limitées disponibles pour les nœuds du réseau, ils ont tendance à donner la priorité au transfert de leurs propres messages ou à refuser de transférer des messages non locaux pour garantir que les messages générés soient livrés avec succès. Ce comportement nuit grandement aux intérêts généraux du réseau. Maintenir les intérêts collectifs du réseau et

inciter les nœuds à faible collaboration à participer à la coopération, cet article introduit une stratégie de transfert forcé pour restreindre le comportement des nœuds qui ne se soucient que de leurs propres intérêts et ne veulent pas coopérer dans le réseau. Cette stratégie favorise la coopération entre les nœuds et optimise les performances du réseau.

La taille de la valeur de transfert forcé CFx du nœud x est déterminée par le degré de collaboration Xx(h) et la valeur de contribution C(i, n) du nœud x, qui est calculée comme suit :

$$CFx = \quad 10 \quad (0{,}3 - Xx(h)) - C(i, n) \quad . \tag{15}$$

Forcer la mise à jour automatique de la valeur de transfert à une fréquence fixe garantit que le comportement de transfert des nœuds peut être surveillé et régulé à certains nœuds temporels. Lorsque CFx > 0, le nœud x doit transmettre les messages CFx générés par d'autres nœuds avant de pouvoir transmettre ses propres messages générés. Lorsque le nœud x est empêché de transférer, afin de transférer ses propres messages en douceur, il ne peut améliorer le degré de collaboration qu'en participant au transfert de messages générés par d'autres nœuds, puis réduire progressivement sa propre valeur de transfert forcé jusqu'à ce qu'il rétablisse finalement la valeur normale. capacité de transfert de messages .

3.2.4. Règles de transaction

Dans SAN, lorsque l'acheteur x rencontre un vendeur y, les deux parties doivent négocier le prix du service de transfert de données selon des règles spécifiques, et les règles de transaction spécifiques de l'algorithme sont les suivantes :

(1) L'acheteur et le vendeur sont pleinement informés du prix du message et de la situation patrimoniale de l'autre partie.

(2) Une fois la transaction commencée, la richesse de l'acheteur est le prix de la dépense donné par l'acheteur x sous la forme BNpx(h) et le prix donné par le vendeur y sous la forme SNpy(h). Si BNpx(h) ≥ SNpy(h), alors le message m est transmis avec succès et le message suivant peut être transmis. Si BNpx(h) < SNpy(h), la première transmission de négociation échoue.

(3) Si la première négociation entre l'acheteur et le vendeur échoue, passez à la deuxième étape de négociation. En comparant la richesse des deux parties, les prix respectifs sont ajustés. L'acheteur ajuste BNpx(h) en tenant compte de son degré de coopération, de sa contribution moyenne et de sa pertinence de position, et le vendeur ajuste SNpy(h) en fonction de son degré de coopération, de sa contribution moyenne et de la corrélation sociale entre les nœuds. Les facteurs d'ajustement pour la deuxième négociation sont respectivement k1 et k2 . Les secondes règles de négociation sont les suivantes :

- Si Cx(h) > Cy(h), alors SNpy(h) reste inchangé et BNpx(h) est ajusté selon l'équation BNpx(h) = BNpx(h) (1 + k1), où k1 est calculé comme suit :

$$k1 = \omega 1 \quad Xx(h) + \omega 2 \quad avgCx + \omega 3 \quad g(x), \text{ où} \tag{16}$$

Xx(h) désigne le degré de coopération de x, avgCx désigne le degré de contribution moyen de x et g(x) désigne le pertinence positionnelle du nœud x. Les poids ω1, ω2 et ω3 indiquent respectivement l'influence du degré de coopération, du degré de contribution moyen et de la pertinence de la position du nœud sur le facteur d'ajustement k1 , et la somme des trois est 1. Ici, les poids sont ajustés dynamiquement à l'aide d'une méthode de pondération adaptative, et la valeur du poids est calculée à l'aide de l'équation (17) :

Machine Translated by Google

$$\omega 1 = \frac{Xx(h)}{Xxh+moyenneCx+g(x)}$$
$$\omega 2 = \frac{moyCx}{Xxh+moyenneCx+g(x)} \quad (17)$$
$$\omega 3 = \frac{g(x)}{Xxh+moyenneCx+g(x)}$$

- Si Cy(h) ≥ Cx(h), alors BNpx(h) est inchangé et SNpy(h) est ajusté en fonction de la formule SNpy(h) = SNpy(h) (1 − k2), où k2 est calculé comme suit :

$$k2 = \theta 1 \quad Xy(h) + \theta 2 \quad avgCy + \theta 3 \quad (18)$$

SCxy, où Xy(h) désigne le degré de coopération de y, avgCy désigne le degré de contribution moyen de y et SCxy désigne la corrélation sociale entre les nœuds x et y. Les poids θ1, θ2 et θ3 représentent l'influence du degré de collaboration, de la moyenne degré de contribution et corrélation sociale entre les nœuds sur le facteur d'ajustement k2, respectivement, et la somme des trois est 1. L'ajustement dynamique de ces Les poids suivent également la même méthode que dans l'équation (17).

(4) Si les deux nœuds parviennent à un consensus selon lequel BNpx(h) ≥ SNpy(h) après la deuxième négociation, le message sera transmis comme à l'étape (2). Dans le cas contraire, la transaction sera abandonnée, et la prochaine transaction se poursuivra. Le flux de transactions de messages est affiché dans Figure 2.

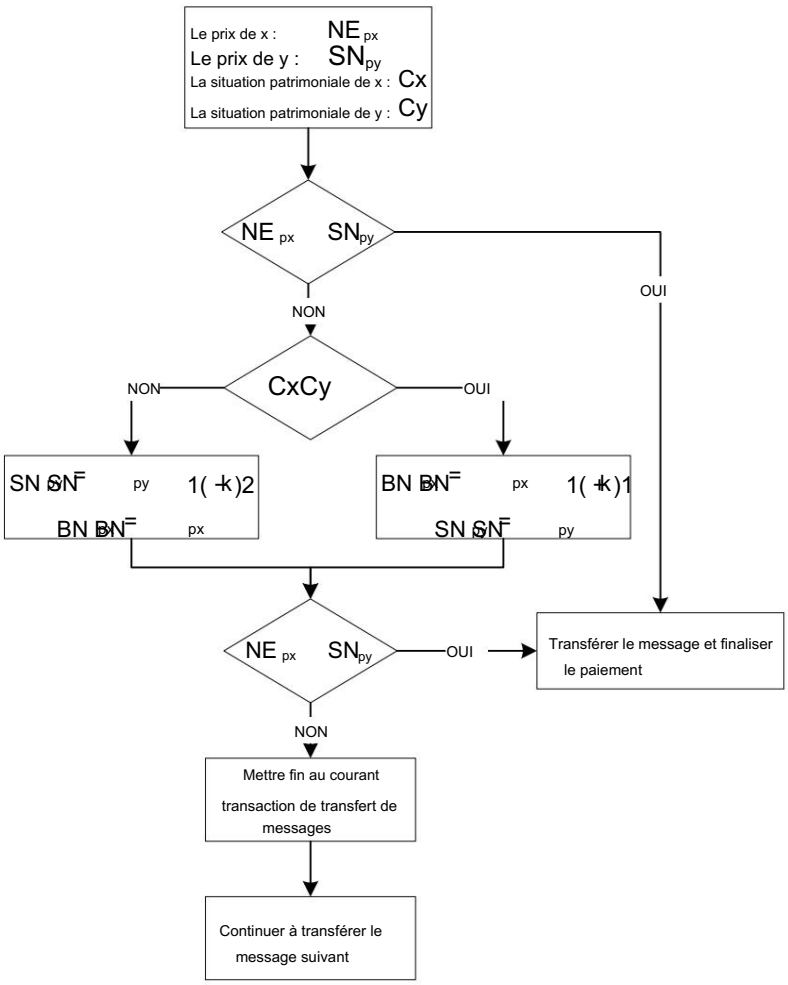


Figure 2. Organigramme de la transaction de message.

Le processus détaillé de l'algorithme normal de transaction de message est présenté dans l'algorithme 1 , qui décrit le processus de négociation complet pour le transfert de message.

Machine Translated by Google

service lorsque deux nœuds se rencontrent sans pénalité de transfert forcé. Le processus de transmission détaillé est le suivant : lorsque les nœuds x et y se rencontrent, x et y donnent leur premières offres respectives pour le service de réexpédition selon les équations (12) à (14), respectivement. Si BNpx ≥ SNpy, alors le message est transmis et le prix de la transaction est fixé au moyenne de BNpx et SNpy. Et puis l'enregistrement de la transaction est intégré dans la blockchain. Au contraire, selon les règles de transaction décrites précédemment, le prix est ajusté en fonction de la situation patrimoniale de x et y pour faire une nouvelle offre. Si BNpx1 ≥ SNpy1, alors un la moitié de la somme de BNpx1 et SNpy1 est le prix de transaction. Et l'enregistrement de la transaction est emballé dans la blockchain après le transfert réussi du message. Si la négociation échoue toujours après que les deux parties ont réajusté leurs prix, elles renoncent à transmettre ce message m, et le message suivant est traité pour le transfert.

Algorithme 1 Algorithme de transaction de message normal

```
Entrée : BNpx, SNpy, Cx, Cy
Résultat : le message de transfert réussi m
1 : si BNpx >= SNpy alors
2 :     Coûtm = (BNpx + SNpy)/2
3 :     x envoie le message m à y, y reçoit le message m
4 :     si le montant de la devise dont x dispose actuellement est supérieur à Costm alors
5 :         Transaction réussie Le bloc                    créer un nouveau bloc
6 :         est ajouté à la fin de la blockchain.
7:          Mettre à jour la richesse de x et y
            retour m
8h9 : fin si
10 : autre
11 :    Recalculez le coût de m et les offres ajustées des deux parties.
12 :    BNpx1 = getPriceTwice_x(BNpx,SNpy Cx, Cy)
13 :    SNpy1 = getPriceTwice_y(BNpx,SNpy Cx, Cy)
14 :    si BNpx1 >= SNpy1 alors
15 :        Coûtm = (BNpx1 + SNpy1)/2
16 :        x envoie le message m à y, y reçoit le message m
17 :        si le montant de la devise dont x dispose actuellement est supérieur à Costm alors
18 :            Transaction réussie Le bloc                créer un nouveau bloc
19 :            est ajouté à la fin de la blockchain.
20 :            Mettre à jour la richesse de x et y
21 :            retour m
22 :        fin si
23 :    autre
24 :        Continuez la transaction suivante.
25 : fin si
26 : fin si
```

3.3. Processus de jeu de transfert de messages

Dans SAN, la transaction de transfert de messages entre les nœuds peut être abstraite sous forme de processus de jeu dynamique. Les participants au jeu dans ce processus sont l'acheteur x et le vendeur y. Il y a deux phases principales : si l'acheteur x envoie ou non une demande de transfert de message et si le vendeur reçoit une demande de transfert de message à ce moment-là. Le comportement de les deux parties dans les deux phases peuvent coopérer ou refuser de coopérer. C'est être On s'attend à ce que les nœuds rationnels du réseau sélectionnent une stratégie qui maximise leur propre avantages. Dans cet article, nous utilisons l'induction rétrospective pour analyser les deux étapes du jeu processus et démontrer que la coopération mutuelle est la stratégie optimale pour les deux parties.

Supposons qu'au temps h, pour le message m, le prix d'enchère de x est BNpx(h) et le le prix d'enchère de y est SNpy(h), alors le prix de transaction pour le message est Costm = $\frac{BNpx(h)+SNpy(h)}{2}$.

Machine Translated by Google

(1) Tout d'abord, analysez la deuxième étape du processus de jeu, si le vendeur y reçoit ou non la demande de transfert de message, et son comportement détermine le profit du nœud. Lorsque y accepte une demande de transfert de message de x, c'est-à-dire choisit un comportement coopératif, le gain actuel Ey de y est calculé comme suit :

$$Ey = SNpy(h) - Coûtm. \tag{19}$$

Lorsque y refuse de recevoir une demande de transfert de message de x, c'est-à-dire choisit de refuser un comportement coopératif, il n'y a aucun gain. De plus, puisque y n'a pas accepté le message lors de sa rencontre avec x, le nombre de messages non locaux transmis par y est moindre, tandis que le nombre de rencontres augmente et le degré de collaboration de y diminue, ce qui entraîne également la participation de la contribution. diminuant. D'après les équations (13) et (14), on peut voir que la prochaine enchère de y pour d'autres messages devient plus élevée, ce qui peut conduire à l'échec de la transaction. En revanche, vous serez disposé à recevoir des messages.

(2) Ensuite, analysez si l'acheteur x envoie ou non des demandes de transfert de messages. Si x envoie des demandes de transfert de message au moment h, c'est-à-dire choisit le comportement coopératif, alors la devise qu'il enregistre Ex peut être exprimée comme

$$Ex = BNpx(h) - Coûtm, \tag{20}$$

Si x n'envoie pas de demande de transfert de message à l'instant h, c'est-à-dire s'il refuse de coopérer, analysez d'abord le coût que x doit payer du point de vue du message à transmettre. Au temps h + 1, le temps de survie du message s'écoule avec lui, et pour réussir à transmettre m, le coût supplémentaire H1 que x doit payer peut être exprimé comme suit :

$$H1 = Mtaille \quad Cx(h+1) \quad PCx(h+1) \quad 1 \quad \frac{Tre(h) - Tre(h+1)}{\text{Durée de vie}}, \tag{21}$$

où Tre(h + 1) désigne le TTL restant de m au temps h + 1, et les significations des autres symboles correspondent à celles de l'équation (12).

De plus, le coût à payer par x est analysé en termes d' énergie et de cache de l'acheteur x. Puisque l'énergie de x diminue strictement à mesure que le temps augmente, et que x refuse de coopérer, son cache est également partiellement occupé par le message m. Par conséquent, au temps h + 1, si x veut envoyer une demande de transfert et que le prix proposé augmente également, alors le prix supplémentaire H2 que x doit payer peut être exprimé comme suit :

$$H2 = \quad 2 \quad \left(\frac{\text{Taille M}}{Brx(h+1)} + \frac{Mtaille}{Erx(h+1)}\right) \quad Lx \quad Cx(h+1) \quad PCx(h+1). \tag{22}$$

où Lx désigne la longueur du message à transmettre par x au temps h + 1, Brx (h + 1) désigne le taux de tampon restant de x au temps h + 1, Erx (h + 1) est le rapport d'énergie restant de x au temps h + 1, et les significations des autres symboles correspondent à celles de l'équation (12).

En résumé, le coût supplémentaire H que devra payer l'acheteur x pour avoir choisi de refuser la coopération au temps h est au moins

$$H = \min\{H1, H2\}. \tag{23}$$

Évidemment, Ex > 0 > −H, donc x doit choisir d'envoyer une demande de transfert de message.

Après l'analyse ci-dessus, les acheteurs et les vendeurs choisiront le comportement coopératif en partant du principe que tous deux obtiendront le maximum d'avantages, c'est-à-dire que (coopération, coopération) est la stratégie optimale.

3.4. Module de

sécurité Cet article adopte une stratégie d'incitation basée sur la monnaie virtuelle pour concevoir l'algorithme, il est donc inévitable qu'un comportement de fausse cotation des nœuds se produise au cours de chaque transaction, ce qui compromet sérieusement l'ordre normal de la transacti

Machine Translated by Google

Afin d'empêcher les nœuds de falsifier illégalement le montant de la monnaie, cet article utilise la technologie blockchain pour créer un module de sécurité garantissant des transactions de transfert de messages ouvertes et transparentes entre les nœuds. La blockchain est un registre numérique décentralisé pour les transactions économiques présentant les avantages de transparence et de sécurité [29-32] Dans le réseau, les enregistrements de toutes les transactions réussies sont enregistrés dans une structure blockchain, généralement dans un ordre séquentiel, et garantis cryptographiquement comme étant infalsifiables et infalsifiables. Chaque nœud de la chaîne est indépendant et égal, s'appuyant sur un mécanisme de consensus pour garantir la cohérence des données, avec les caractéristiques de décentralisation, d'ouverture et de transparence, et de non-falsification [33].

3.4.1. Création de modules

Lors du stockage des données de transaction, chaque nœud du réseau génère une clé publique PK et une clé secrète SK au moyen d'un algorithme de chiffrement à clé publique (par exemple RSA). Parmi eux, le SK est conservé en toute sécurité par le nœud, tandis que le PK est accessible au public sur le réseau. Pour garantir la sécurité du processus de transaction et éviter les fausses cotations, ce document effectue le processus suivant pour l'enregistrement de transaction généré entre l'initiateur A et l'accepteur B d'une transaction, qui contient les parties à la transaction A et B, le prix de la transaction, le coût , etc. : (1) Création de bloc : lorsque la

transaction de message entre A et B est terminée avec succès, utilisez la fonction de hachage (SHA-256) pour calculer la valeur de hachage de chaque élément de l' enregistrement de transaction. Ensuite, le SK de A est utilisé pour signer la valeur de hachage H(coût) du prix de la transaction, générant SigSK(H(coût)). Ensuite, l'enregistrement de la transaction, la valeur de hachage et la signature sont regroupés dans un nouveau bloc et diffusés sur l'ensemble du réseau afin que les autres nœuds puissent le vérifier.

(2) Vérification : B peut utiliser le PK de A pour vérifier la signature numérique et recalculer la valeur de hachage H′ (coût) du prix de transaction. Si ces deux valeurs de hachage correspondent, alors le processus de vérification réussit, ce qui indique que les données de transaction n'ont pas été falsifiées en termes de prix lors de la transmission. D'autres nœuds du réseau vérifieront si la transaction dans le bloc est valide après avoir reçu le nouveau bloc.

(3) Obtention d'un consensus : lorsqu'un nombre suffisant de nœuds confirme que le la transaction est valide et qu'un consensus est atteint, le bloc est considéré comme valide.

(4) Mise à jour de la blockchain : une fois qu'un nouveau bloc a obtenu un consensus à l'échelle du réseau, il est ajouté à la fin de la blockchain, comme le montre la figure 3. Ce processus de mise à jour garantit le consensus et la cohérence de l'historique des transactions sur l'ensemble du réseau.

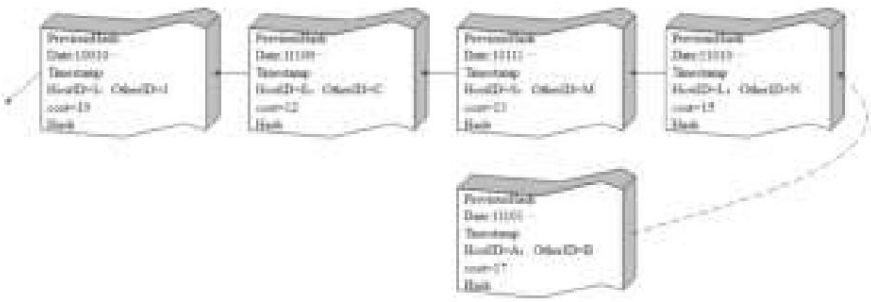


Figure 3. Diagramme schématique de la blockchain.

La falsification des données de transaction est assurée par l'utilisation d'algorithmes de hachage dans les modules créés via le processus ci-dessus. Chaque nouveau bloc contient la valeur de hachage du bloc précédent, et toute falsification des données de transaction modifiera sa valeur de hachage, perturbant ainsi la continuité de l'ensemble de la blockchain et rendant tout comportement malhonnête facile à reconnaître et à rejeter par les autres nœuds du réseau. . De plus, les données de transaction sont transparentes et dignes de confiance car les enregistrements de transaction vérifiés sont écrits en blocs et ajoutés à la blockchain, ce qui garantit la transparence et la fiabilité des données de transaction. Tout nœud participant au réseau peut accéder et vérifier ces enregistrements de transactions, empêchant ainsi efficacement l'apparition d'un problème.

Machine Translated by Google

comportement de fausse citation. Tous les nœuds suivent le principe de la chaîne la plus longue, ce qui signifie que lorsque plusieurs chaînes de branches concurrentes existent, les nœuds choisiront de rejoindre la chaîne valide la plus longue comme la chaîne principale, assurant la robustesse et la sécurité de la blockchain. Ainsi, l'équité et la sécurité du processus de transaction de messages dans le réseau est assurée grâce à l'utilisation de la blockchain.

3.4.2. Schéma de transfert

Le processus complet du service de transfert de messages dans DFIA est présenté dans l'algorithme 2. Supposons que le nœud x rencontre le nœud y, x doit transmettre le message m à y, où CFx désigne le valeur de transfert forcé de x. CFx est jugé avant la transaction de transfert de message. Lorsque CFx > 0, x entre dans la phase de renvoi forcé ; il est obligé de transmettre des messages non locaux. Pour chaque transaction réussie du service de transfert de messages, la valeur de CFx est décrémenté de un, et vice versa ; il continue de transmettre le message suivant. Lorsque CFx ≤ 0, x effectue la transaction normale de transfert de message selon Algorithme 1. Pendant la transaction du service de transfert de messages, le service de transfert est le prix est fixé selon les équations (12) à (14), et la négociation est effectuée selon des règles de transactions. Si la négociation aboutit et que le message est transmis avec succès, les informations sur la transaction, y compris les deux parties x et y, le prix de la transaction, etc., sont regroupées dans le bloc et ajouté à la blockchain après vérification. Sinon, la transaction échoue et le message suivant est transféré.

Algorithme 2 Algorithme IDAFD

```
Entrée : CFx, x, y
Résultat : le message de transfert réussi m
 1 : si CFx > 0 alors
 2 : si le nœud source du message n'est pas le nœud x alors
 3 : si BNpx >= SNpy alors
 4 : Coûtm = (BNpx + SNpy )/2
 5 : si le montant de la devise dont x dispose actuellement est supérieur au coût alors
 6 : Transaction réussie 7 : Le bloc est ajouté à la                                  créer un nouveau bloc
 fin de la blockchain.
 8 : Mettre à jour la richesse de x et y
 9 : CFx = CFx − 1
10 : retour m
11 : fin si
12 : autre
13 : Recalculez le coût de m et les offres ajustées des deux parties.
14 : BNpx1 = getPriceTwice_x(BNpx,SNpy Cx, Cy)
15 : SNpy1 = getPriceTwice_y(BNpx,SNpy Cx, Cy)
16 : si BNpx1 >= SNpy1 alors
17 : Coûtm = (BNpx1 + SNpy1)/2
18 : si le montant de la devise dont x dispose actuellement est supérieur à Costm alors
19 : Transaction réussie 20 : Le bloc est ajouté à la fin                            créer un nouveau bloc
de la blockchain.
21 : Mettre à jour la richesse de x et y
22 : CFx = CFx − 1
23 : retour m
24 : fin si
25 : autre
26 : Continuer la transaction suivante
27 : fin si
28 : fin si
29 : fin si
30 : autre
                                                  Algorithme de transaction de message normal
31h32 : fin si
33 : fonction CREATENEWBLOCK(hostX, autre, m, coût)
        précédentHash ← blockchain.getLastBlock().getHash()
        horodatage ← SimClock.getTime()
        Signez la valeur de hachage du coût de transaction à l'aide de la clé privée SK de A.
        newBlock ← nouveau bloc (hostX, autre, m, coût, previousHash, horodatage, 0)
        blockHash ← newBlock.calculateHash()
        nouveauBlock.setHash(blockHash)
        retourner nouveauBloc
34 : 35 : 36 : 37 : 38 : 39 : 40 : 41 : fin de fonction
```

Machine Translated by Google

4. Évaluation des performances

4.1. Environnement et scénario de simulation

Les expériences rapportées dans ce chapitre ont été menées sur un ordinateur personnel avec un processeur de 3,60 GHz, 16,0 Go de RAM et un système d'exploitation Windows 11, exécutant le simulateur d'environnement de réseau opportuniste [34] (ONE) via IntelliJ IDEA Fonctionnement du logiciel 2021.2.1. Dans les expériences, cette étude a adopté le routage Spray et Wait comme algorithme de routage sous-jacent et comparé DFIA avec RSIA dans [26], STIA dans [25], et EEIS dans [24] pour la simulation. Les cinq scénarios de simulation suivants ont été conçus :

(1) S + nœuds égoïstes ;
(2) S + nœuds égoïstes + DFIA ;
(3) S + nœuds égoïstes + RSIA ;
(4) S + nœuds égoïstes + STIA.
(5) S + nœuds égoïstes + EEIS.

Les paramètres expérimentaux spécifiques sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres des expériences de simulation.

Paramètre	Valeur
Temps de simulation	12 heures
Nombre de nœuds	180
Zone de simulation	4 500 m × 3 400 m
Vitesse de transmission	250 Ko/s
Portée de transmission	10 m
Modèle de mouvement	ShortestPathMapBasedMovement
Protocole de routage	Vaporisez et attendez
Taille du tampon	10 M
Durée de vie du message	6 heures
Transmettre de l'énergie	4 W
Énergie initiale	2000 J
Intervalle de création des messages	25 s à 35 s
Taille du message	500 Ko à 1 Mo
α	0,1
β, γ, σ1 , σ2 ρ	0,3
	0,6
	0,45

4.2. Paramètres de performance

Les expériences de simulation utilisent principalement les trois paramètres suivants comme critères d'évaluation. critères de sélection pour évaluer l'efficacité et le caractère pratique de l'algorithme d'incitation.

Probabilité de livraison des messages : il s'agit du rapport entre le nombre total de messages livrés avec succès au nœud de destination et le nombre total de messages créés. UN un taux de remise de message plus élevé indique un taux de réussite plus élevé du nœud dans le transfert du message au nœud de destination. La probabilité de livraison des messages est un facteur extrêmement important paramètre d'évaluation des performances du réseau.

Latence moyenne : c'est le temps moyen consommé par un message depuis son origine au transfert réussi vers le nœud de destination. Une latence plus faible signifie moins de réseau les ressources seront consommées lors du transfert du message et le message prendra moins de temps le temps d'atteindre la destination.

Surcoût du réseau : il est représenté par le rapport de la différence entre le nombre de messages relayés par les nœuds du réseau et nombre de messages réussis messages transférés au nombre de messages transférés avec succès. Une réduction de la surcharge du réseau est indicative d'une réduction de la consommation d'énergie par le nœud pendant transfert de messages.

Machine Translated by Google

4.3. Résultats de la simulation

Dans cette étude, les expériences d'évaluation ont été conçues en termes de différents pourcentages de nœuds égoïstes et de différents TTL. Lors de la première évaluation, nous avons observé les résultats expérimentaux en définissant le pourcentage de nœuds égoïstes à 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %. Les figures 4 à 6 illustrent les performances comparatives de chaque algorithme en termes de probabilité de livraison des messages, de latence moyenne et de surcharge du réseau en trois dimensions lorsque différents pourcentages de nœuds égoïstes existent dans les cinq scénarios ci-dessus. Lors de la deuxième évaluation, le pourcentage de nœuds égoïstes a été fixé à 60 % et la durée de vie du message a été fixée à 2 h, 4 h, 6 h, 8 h et 10 h, respectivement. Les figures 7 à 9 montrent les changements dans la probabilité de livraison des messages, la latence moyenne et la surcharge réseau de chaque algorithme pour les cinq scénarios mentionnés ci-dessus sous différentes durées de vie des messages. Au total, 30 essais ont été menés pour chaque ensemble d'expériences d'évaluation, et la valeur moyenne des données de ces essais a été prise comme résultat expérimental final.

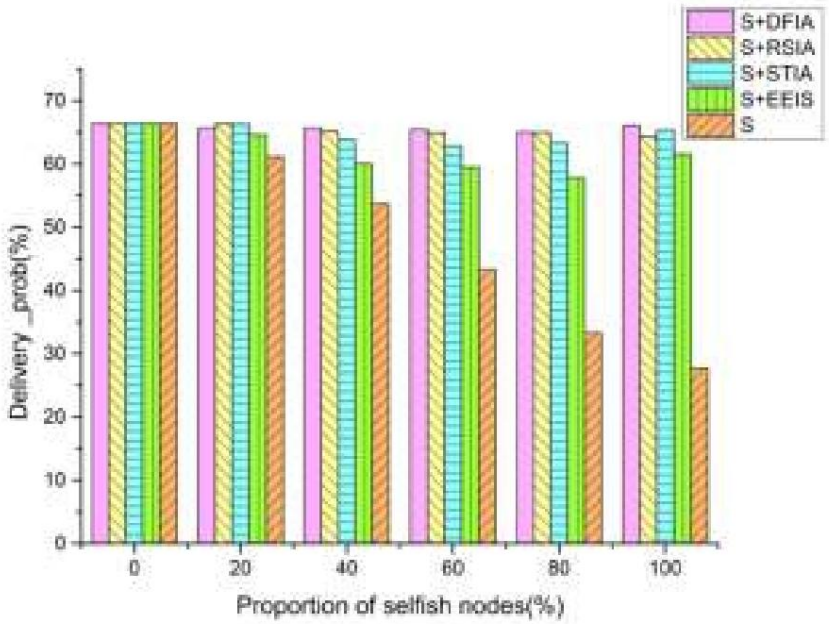


Figure 4. Probabilité de livraison du message avec différents pourcentages de nœuds égoïstes.

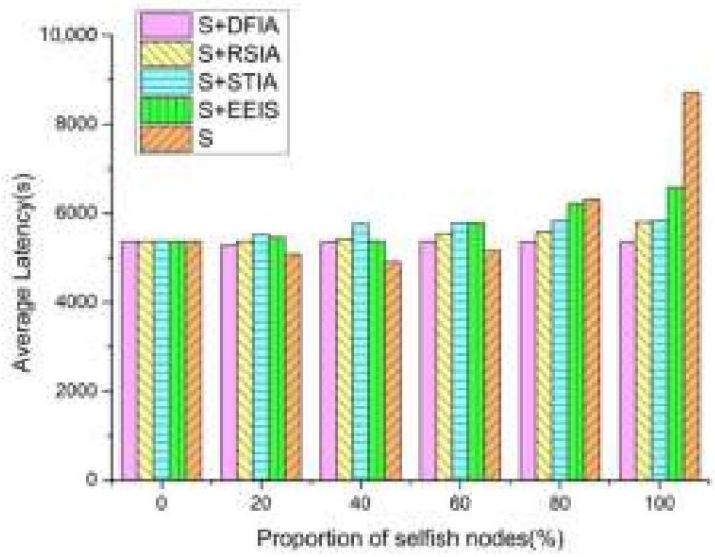


Figure 5. Latence moyenne avec différents pourcentages de nœuds égoïstes.

Machine Translated by Google

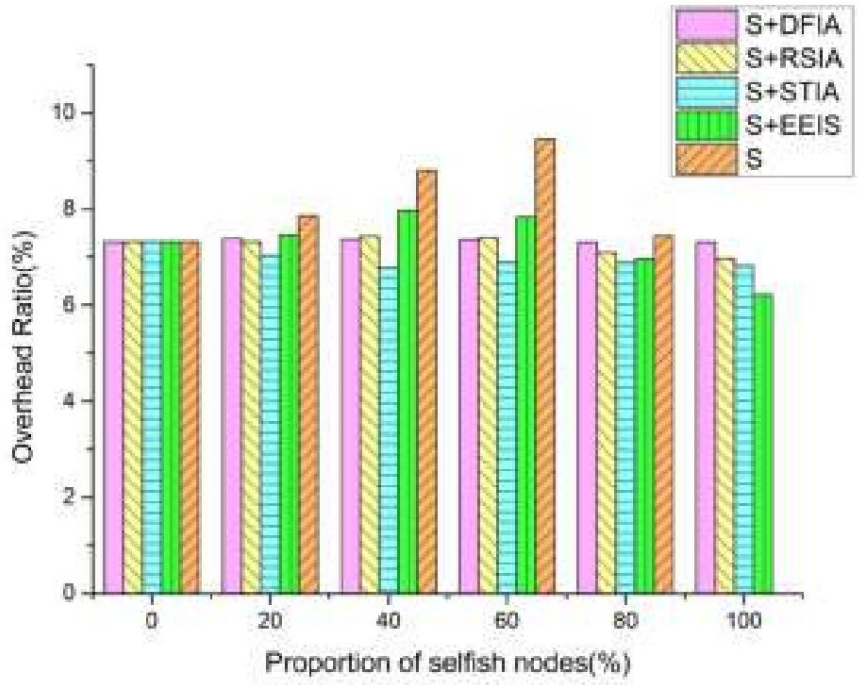


Figure 6. Surcharge réseau pour différents pourcentages de nœuds égoïstes.

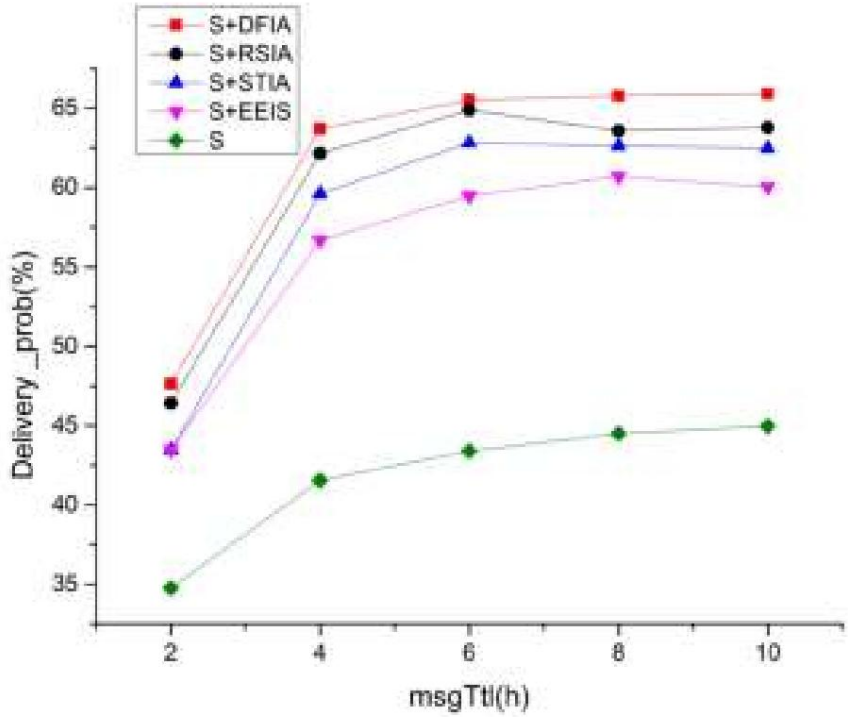


Figure 7. Probabilité de livraison du message sous différents TTL de message.

Machine Translated by Google

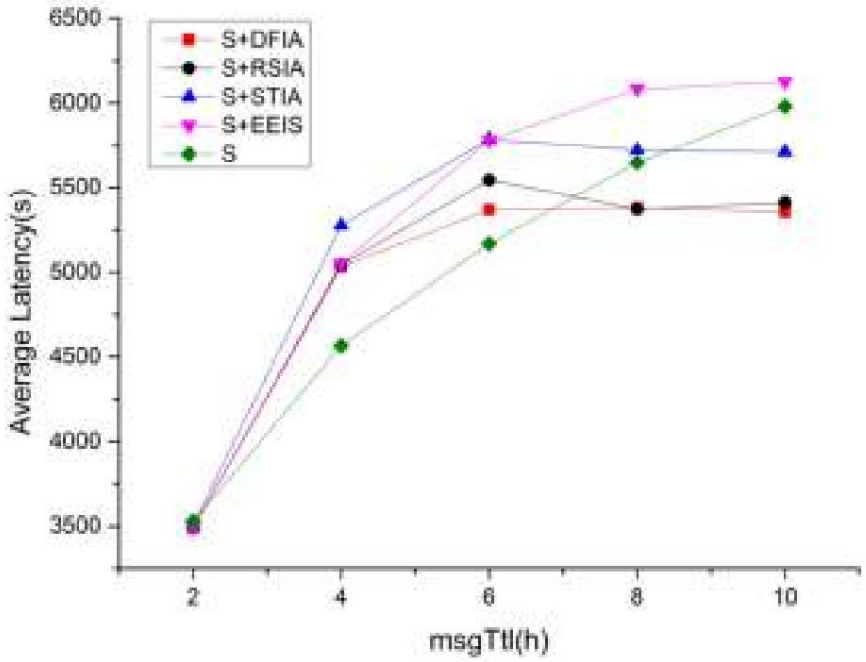


Figure 8. Latence moyenne à différents TTL de message.

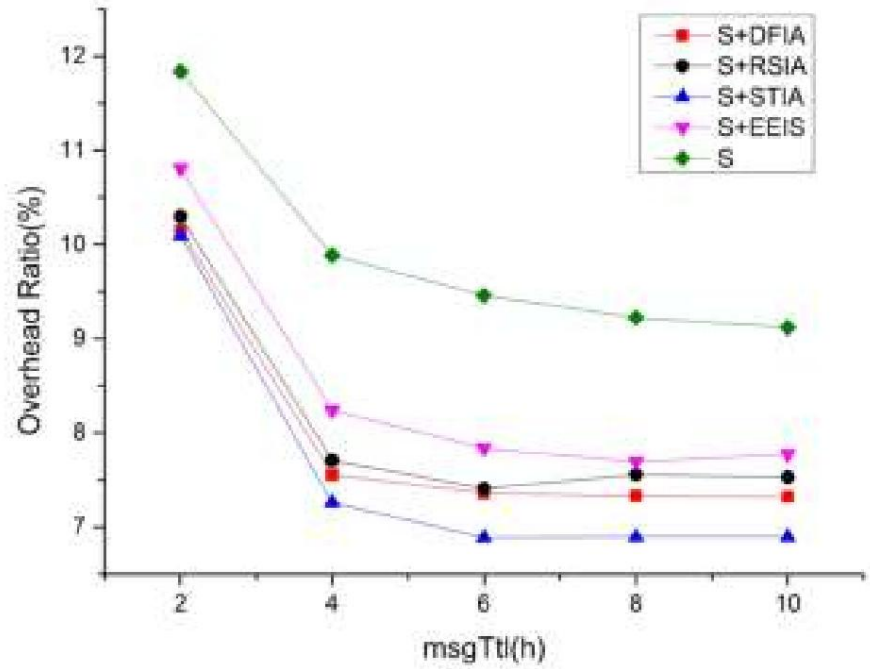


Figure 9. Surcharge réseau à différents TTL de message.

4.3.1. Différents pourcentages de nœuds égoïstes

Comme le montre la figure 4, la probabilité de livraison du message pour les cinq scénarios avec différents pourcentages de nœuds égoïstes est représentée. La diminution des pourcentages de livraison des messages peut être attribuée au fait que les nœuds égoïstes ne participent pas au comportement coopératif de transfert, ce qui réduit le taux de réussite des messages atteignant le nœud de destination. La tendance générale indique que l'ajout de nœuds égoïstes fait que DFIA, RSIA et STIA agissent comme une incitation dans le cas de nœuds ayant un comportement égoïste. Cependant, DFIA est plus efficace que RSIA et STIA. S a une tendance plus prononcée à diminuer le taux de livraison des messages car il n'utilise aucune incitation. RSIA se concentre sur les contraintes de ressources et la présence possible de contraintes de ressources dans les nœuds très riches

Machine Translated by Google

et l'impact possible de l'égoïsme préféré sur le réseau. STIA prend en compte la qualité du service de transfert des nœuds ainsi que les effets possibles d' une pénurie de devises à court terme lors de la prise de décisions concernant les comportements de transfert des nœuds. EEIS utilise la tarification des ressources des nœuds et adopte le mode d'échange équivalent pour effectuer les transactions Cependant, ils ne prennent pas en compte l'influence de la corrélation de localisation entre les nœuds ni l' influence des corrélations sociales fortes et faibles entre les nœuds. DFIA prend en compte de manière exhaustive les caractéristiques de l'emplacement des nœuds et les corrélations sociales. Bien que sa probabilité de livraison de messages soit inférieure de 0,68 % à celle du RSIA lorsqu'il y a 20 % de nœuds égoïstes, avec l'augmentation continue du nombre de nœuds égoïstes, la probabilité de livraison de DFIA est plus élevée que celle des autres algorithmes. Sur la base de l'évaluation de l'effet global de l'expérience, DFIA démontre la performance optimale en termes de probabilité de livraison des messages.

La figure 5 illustre la latence moyenne pour les cinq scénarios avec différentes proportions de nœuds égoïstes. L'augmentation du délai moyen signifie que l'ajout de nœuds égoïstes entraîne un délai plus long pour la transmission des messages vers la destination. Les données présentées dans la figure 5 révèlent qu'à mesure que la proportion de nœuds égoïstes augmente de 0 % à 100 %, la latence moyenne augmente dans tous les scénarios, avec des degrés d'augmentation variables. S présente l' augmentation la plus significative de la latence moyenne, surtout lorsque la proportion de nœuds égoïstes atteint 60 % ; sa valeur de latence moyenne augmente considérablement car aucune mesure incitative n'est adoptée. Dans les quatre scénarios restants, l'augmentation de la latence moyenne est relativement douce et ne semble pas augmenter brusquement. Parmi eux, la latence moyenne de DFIA est la plus stable et sa latence moyenne est inférieure à celle de RSIA, STIA et EEIS. Cela indique que l'adoption d'une stratégie d'incitation DFIA est plus propice à atténuer l'impact des nœuds égoïstes, et qu'elle améliore la probabilité de livraison du message et réduit en même temps la latence moyenne.

La figure 6 représente la surcharge du réseau dans les cinq scénarios avec différents pourcentages de nœuds égoïstes. À partir des données de la figure, on peut voir qu'avec la proportion croissante de nœuds égoïstes, la surcharge du réseau des quatre autres scénarios, à l'exception de S sans incitations, diminue généralement et évolue de manière plus stable. Dans le scénario S, la surcharge du réseau diminue fortement lorsque la proportion de nœuds égoïstes dépasse 60 %, et elle diminue directement jusqu'à 0 lorsque la proportion de nœuds égoïstes dans le réseau est de 100 % car il y a de plus en plus de nœuds égoïstes dans le réseau, et les nœuds ne sont pas capables de relayer les messages ou de transmettre avec succès les messages au nœud de destination en l' absence de stratégies d'incitation. Lorsque la proportion de nœuds égoïstes atteint 60 %, la surcharge globale du réseau de DFIA est élevée par rapport à RSIA, STIA, EEIS et S sans incitations. En effet, la DFIA introduit la technologie blockchain dans l'utilisation de RSA pour chiffrer les enregistrements de transactions, ce qui entraîne une surcharge globale du réseau plus élevée au détriment d'une surcharge réseau plus élevée en augmentant la probabilité de livraison des messages et en garantissant la sécurité de la transaction.

4.3.2. Différents TTL

La figure 7 illustre la probabilité de remise des messages pour les scénarios ci-dessus sous différentes durées de vie des messages. Il est évident que la probabilité de livraison du message augmente avec chaque augmentation de la durée de vie du message. L'augmentation du TTL des messages signifie que les nœuds ne sont pas limités par trop de contraintes de temps lors du transfert des messages. Il y a suffisamment de temps pour transférer les messages, ce qui peut éviter la situation de suppression de messages et la baisse des performances du réseau qui en résulte. Par rapport aux quatre autres algorithmes, la probabilité de livraison des messages de DFIA est clairement optimale, ce qui dépend du fait que DFIA prend en compte les facteurs conduisant à l'égoïsme des nœuds sous de nombreux aspects, ce qui, à son tour, motive les nœuds égoïstes à prendre participer à la coopération. En revanche, RSIA, STIA et EEIS ne prennent pas en compte l'effet de la pertinence de l'emplacement des nœuds sur les nœuds et ne distinguent évidemment pas la force de la corrélation sociale, ce qui conduit à des incitations moins efficaces. On peut voir que DFIA peut efficacement empêcher les nœuds de laisser tomber des messages, ce qui rend la probabilité de livraison des messages optimale.

Machine Translated by Google

La figure 8 illustre la latence moyenne des quatre scénarios sous différentes durées de vie des messages. Il est clair que la latence moyenne augmente pour tous à mesure que la durée de vie du message augmente. Une augmentation du TTL des messages signifie que les messages ont plus de chances d'être livrés à une plus grande distance dans le réseau, ce qui, à son tour, entraîne une augmentation du nombre de paquets dans la congestion des nœuds lors de la transmission des données et un augmentation conséquente de la latence du réseau. Le délai moyen de ces cinq scénarios a une tendance à la hausse significative avec l'augmentation du TTL du message, et l' augmentation maximale du délai moyen est observée pour S, qui ne prend aucune in
En comparaison, les systèmes DFIA, RSIA, STIA et EEIS présentent une augmentation plus faible de la latence moyenne. Parmi eux, la latence moyenne de DFIA est inférieure à celle de RSIA, STIA et EEIS, ce qui est dû au fait que même si STIA prend en compte les ressources du nœud et la qualité de service, il ignore le facteur de corrélation sociale du nœud, ce qui augmente la latence moyenne. du message dans une certaine mesure. RSIA ne considère que les raisons égoïstes des nœuds, mais ne prend pas en compte les relations de position entre eux et fait la distinction entre les corrélations sociales fortes et faibles, ce qui conduit à une latence moyenne plus élevée. EEIS adopte la négociation quadratique et ne considère pas que le message ne peut pas être transmis à temps en raison de la perte de paquets du nœud, ce qui affecte la latence moyenne. DFIA prend en compte les relations de position entre les nœuds et introduit le facteur de corrélation sociale, améliorant ainsi le taux de livraison du message et réduisant la latence moyenne.

La figure 9 illustre la comparaison des frais généraux du réseau. À mesure que la durée de vie du message augmente, la surcharge du réseau dans tous les scénarios diminue progressivement. Étant donné que S ne prend aucune mesure incitative, sa surcharge de réseau est supérieure à celle de DFIA, RSIA, STIA et EEIS. STIA prend en compte la qualité de service des nœuds et réduit les interactions de messages pendant le processus de négociation, optimisant ainsi le temps de rencontre pour la livraison des messages et réduisant la surcharge du réseau. EEIS ne prend en compte que la tarification des ressources des nœuds et utilise la valeur du crédit pour les prêts monétaires. Il ne prend pas en compte le comportement de perte de paquets provoqué par la baisse de la capacité de transaction due à un emprunt excessif et à un défaut de remboursement, ce qui entraîne une surcharge élevée du réseau. DFIA prend en compte les ressources des nœuds, les attributs de localisation et les corrélations sociales pour le jeu de négociation, ce qui rend son effet incitatif plus important que celui du RSIA, et il a également une charge réseau plus faible. En raison de la prise en compte de plusieurs facteurs lors des négociations dans le DFIA, davantage d'interactions d'informations sont générées et la surcharge du réseau est plus élevée que dans le STIA. Mais DFIA augmente la probabilité de livraison des messages et réduit la latence moyenne, et l'effet incitatif global est meilleur que celui de STIA.

5. Conclusions

Dans cet article, nous proposons un algorithme de tarification dynamique et d'incitation à transfert forcé (DFIA) basé sur les ressources. DFIA négocie le service de transfert requis par les nœuds en intégrant l'urgence de livraison déterminée par l'état des ressources du nœud, la pertinence de l'emplacement et en distinguant les corrélations sociales fortes et faibles. Pendant le processus de transaction, la stratégie de transfert forcé est conçue pour améliorer le degré de collaboration entre les nœuds. Afin d'empêcher les nœuds d'effectuer de fausses cotations, DFIA utilise la technologie blockchain pour le cryptage afin d'assurer la transparence et la crédibilité des données de transaction. Les résultats des expériences de simulation montrent que DFIA réduit la latence moyenne tout en augmentant la probabilité de livraison des messages et incite efficacement les nœuds égoïstes à participer à la coopération. Cependant, l'algorithme utilise RSA pour chiffrer les enregistrements de transactions, ce qui entraîne une surcharge globale du réseau plus élevée, qui doit être résolue et optimisée dans les travaux futurs. Nous examinerons ensuite les mesures de sécurité à prendre face à d'éventuels comportements malveillants, tels que la collusion entre nœuds et la falsification des messages dans un SAN.

Machine Translated by Google

Contributions des auteurs : Conceptualisation, XZ, YL (Yuan Li) et ZX ; méthodologie, YL (Yuan Li); logiciel, YL (Yuan Li); validation, ZX, YL (Yuan Li) et XZ ; ressources, XZ, YL (Yuan Li) et ZX ; conservation des données, YL (Yuan Li) ; rédaction – préparation du projet original, YL (Yuan Li) et DH ; rédaction – révision et édition, ZX, YL (Yanchao Liu) et SW ; administration du projet, ZX Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (numéro de subvention n° 61972136) et la Fondation de soutien à l'équipe d'innovation scientifique pour les jeunes du département provincial de l'éducation du Hubei (numéro de subvention n° T201410, T2020017).

Déclaration de disponibilité des données : les données sont contenues dans l'article.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Wang, Z. ; Liao, J. ; Cao, Q. ; Qi, H. ; Wang, Z. Atteindre la couverture k-Barrier dans les réseaux de capteurs directionnels hybrides. IEEETrans. Foule. Calculer. 2014, 13, 1443-1455. [Référence croisée]
2. Tsugawa, S. ; Ohsaki, H. Structure communautaire et localité d'interaction dans les réseaux sociaux. J. Inf. Processus. 2015, 23, 402-410. [Référence croisée]
3. Ning, Z. ; Liu, L. ; Xia, F. ; Jedari, B. ; Lee, moi; Zhang, W. CAIS : Un programme d'incitation ajustable en matière de copie dans le domaine social communautaire Réseautage conscient. IEEETrans. Véh. Technologie. 2017, 66, 3406-3419. [Référence croisée]
4. Xu, F. ; Xu, Q. ; Xiong, Z. ; Xiao, N. ; Xie, Y. ; Deng, M. ; Hao, H. Schéma de routage distribué intelligent basé sur la similarité sociale pour les réseaux sociaux mobiles. Futur Gén. Calculer. Système. 2019, 96, 472-480. [Référence croisée]
5. Zhu, K. ; Li, W. ; Fu, X. SMART : une stratégie de routage adaptée aux réseaux sociaux et mobiles pour les réseaux tolérants aux perturbations. IEEETrans. Véh. Technologie. 2014, 63, 3423-3434. [Référence croisée]
6. Annalisa, S. ; Antonio, C. ; Floriano, DR ; Peppino, F. Routage dans les réseaux sociaux mobiles opportunistes avec des nœuds égoïstes. Fil. Commun. Foule. Calculer. 2019, 2019, 6359806.
7. Xia, F. ; Liu, L. ; Jedari, B. ; Das, SK PIS : un protocole de routage multidimensionnel pour les réseaux socialement responsables. IEEETrans. Foule. Calculer. 2016, 15, 2825-2836. [Référence croisée]
8. Galati, A. Réseau tolérant aux retards ; LAP Lambert Academic Publishing : Cologne, Allemagne, 2010.
9. Luciana, P. ; Andréa, P. ; Marco, C. Réseaux opportunistes : transfert de données dans des réseaux mobiles ad hoc déconnectés. IEEE Commun. Mag. 2006, 44, 134-141.
10. Xia, F. ; Liu, L. ; Li, J. ; Mohammed, AA ; Tianruo, YL; Jianhua, M. BEEINFO : Transfert basé sur les intérêts à l'aide d'abeilles artificielles Colonie pour les réseaux socialement responsables. IEEETrans. Véh. Technologie. 2015, 64, 1188-1200. [Référence croisée]
11. Wu, J. ; Yu, G. ; Guan, P. Méthode prédite de probabilité de caractéristique d'intérêt dans les réseaux sociaux opportunistes. Accès IEEE 2019, 7, 59002-59012. [Référence croisée]
12. Elnaz, N. ; Nahideh, D. FTR : propose un routage arborescent dans les réseaux sociaux mobiles. Fil. Réseau. 2020, 26, 283-291.
13. Mao, Y. ; Zhou, C. ; Qi, J. ; Zhu, X. Un mécanisme d'incitation équitable basé sur le crédit pour le routage dans un réseau de capteurs basé sur DTN avec des nœuds égoïsme. EURASIP J. Wirel. Commun. Réseau. 2020, 2020, 232. [Réf. croisée]
14. Loudari, SE; Benamar, N. Effets de l'égoïsme sur la consommation d'énergie dans les réseaux opportunistes : une évaluation des performances. Dans Actes de la Conférence internationale 2019 sur les technologies sans fil, les systèmes embarqués et intelligents (WITS), Fès, Maroc, 3 et 4 avril 2019 ; p. 1 à 7.
15. Li, Q. ; Gao, W. ; Zhu, S. ; Cao, G. Un protocole de routage pour les réseaux socialement égoïstes tolérants aux délais. Réseau ad hoc. 2012, 10, 1619-1632. [Référence croisée]
16. Zhang, X. ; Deng, H. ; Xiong, Z. ; Liu, Y. ; Rao, Y. ; Lyu, Y. ; Li, Y. ; Hou, D. ; Li, Y. Stratégie de routage sécurisé basée sur les attributs Faites confiance au contrôle d'accès dans les réseaux sociaux. J. Processus de signal. Système. 2024, 96, 153-168. [Référence croisée]
17. Chang, J. ; Pang, Z. ; Xu, W. ; Wang, H. ; Yin, G. Un mécanisme de réputation compatible avec les incitations pour les systèmes P2P. J. Supercalculateur. 2014, 69, 1382-1409. [Référence croisée]
18. Roy, A. ; Acharya, T. ; Das Bit, S. Transfert de données basé sur la réputation et basé sur les réseaux sociaux pour une diffusion multidiffusion améliorée en présence de nœuds égoïstes dans les DTN. Int. J.Commun. Système. 2020, 33, e4235. [Référence croisée]
19. Bounouni, M. ; Bouallouche-Medjkoune, L. Schéma de punition et de stimulation basé sur l'acquittement pour réseau mobile ad hoc. J. Supercalculateur. 2018, 74, 5373-5398. [Référence croisée]
20. Wang, EK; Chen, CM ; Yiu, SM; Hassan, MM; Alrubaian, M. ; Fortino, G. Modèle de jeu évolutif incitatif pour les opportunistes réseaux sociaux. Futur Gén. Calculer. Système. 2020, 102, 14-29. [Référence croisée]
21. Wu, J. ; Mo, W. ; Yin, X. ; Bai, G. Recherche sur le mécanisme d'incitation au routage opportuniste basé sur le jeu répété dans les WMN. Calculer. Ing. Appl. 2018, 54, 5.
22. Haq, A. ; Faheem, Y. Un protocole de distribution de contenu basé sur la communication peer-to-peer pour une tolérance aux retards tenant compte des incitations réseaux. Fil. Réseau. 2020, 26, 583-601. [Référence croisée]
23. Li, L. ; Zhong, X. ; Jiang, Y. IAR-GT : Un routage incitatif basé sur la théorie des jeux pour les réseaux opportunistes égoïstes. KSII Trans. Informations Internet. Système. 2019, 13, 152-171.

Machine Translated by Google

24. Xiong, Z. ; Xiao, N. ; Xu, F. ; Zhang, X. ; Xu, Q. ; Zhang, K. ; Ye, C. Un système d'incitation équivalent au transfert de données basé sur l'échange pour les réseaux socialement conscients. J. Processus de signal. Système. 2021, 93, 249-263. [Référence croisée]
25. Xiong, Z. ; Li, X. ; Zhang, X. ; Zhu, S. ; Xu, F. ; Zhao, X. ; Wu, Y. ; Zeng, M. Un algorithme d'incitation en deux étapes basé sur la tarification des services pour réseaux socialement conscients. J. Processus de signal. Système. 2022, 94, 1227-1242.
26. Zhang, X. ; Rao, Y. ; Xiong, Z. ; Deng, H. ; Xu, F. ; Yuan, L. Algorithme d'incitation aux ressources limitées et socialement égoïste pour réseaux socialement conscients. J. Processus de signal. Système. 2023, 95, 1439-1453.
27. Spyropoulos, T. ; Psounis, K. ; Raghavendra, CS Spray and wait : un schéma de routage efficace pour les réseaux mobiles connectés par intermittence. Dans Actes de l'atelier ACM SIGCOMM 2005 sur les réseaux tolérants aux délais, New York, NY, États-Unis, 26 août 2005 ; pp. 252-259.
28. Cui, J. ; Liu, S. ; Chang, Y. ; Liu, Q. ; Wu, Q. Algorithme de routage efficace basé sur une transaction en monnaie virtuelle dans DTN. Calculer. Sci. 2024, 51, 300-308.
29. Li, X. ; Jiang, P. ; Chen, T. ; Luo, X. ; Wen, Q. Une enquête sur la sécurité des systèmes blockchain. Futur Gén. Calculer. Système. 2020, 107, 841-853. [Référence croisée]
30. Deng, M. ; Lyu, Y. ; Yang, C. ; Xu, F. ; Ahmed, M. ; Yang, N. ; Xu, Z. ; Ke, C. Schéma de gestion de confiance léger basé sur la blockchain dans les systèmes IoT intelligents aux ressources limitées. IEEE Internet Things J. 2024, 11, 25706-25719. [Référence croisée]
31. Matsumoto, S. ; Reischuk, RM IKP : Restructurer une PKI avec des incitations automatisées décentralisées. Dans les actes de l'édition 2017 Symposium IEEE sur la sécurité et la confidentialité (SP), San Jose, Californie, États-Unis, 22-26 mai 2017 ; pp. 410-426.
32. Lui, Y. ; Li, H. ; Cheng, X. ; Liu, Y. ; Yang, C. ; Sun, L. Un mécanisme d'incitation véridique basé sur la blockchain pour les applications P2P distribuées. Accès IEEE 2018, 6, 27324-27335. [Référence croisée]
33. Zhang, W. ; Wang, H. ; Hua, H. ; Wang, Q. Stratégies d'exploitation minière et de défense égoïstes dans le Bitcoin. Intell. Automatique. Informatique douce. 2022, 34, 1861-1875. [Référence croisée]
34. Keränen, A. ; Ott, J. ; Kärkkäinen, T. Le simulateur ONE pour l'évaluation du protocole DTN. Dans Actes de la 2e Internationale Conférence sur les outils et techniques de simulation, Rome, Italie, 2-6 mars 2009 ; STIC : Bruxelles, Belgique, 2010 ; p. 1 à 10.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Implémentation FPGA de la classification d'objets basée sur des piliers pour Robot mobile autonome

Parc Chaewoon [1], Seongjoo Lee [2,3] et Yunho Jung [1,4,*]

[1] École d'ingénierie électronique et informatique, Université aérospatiale de Corée, Goyang-si 10540, République de Corée ; pcw0201@kau.kr
[2] Département de génie électrique, Université de Sejong, Séoul 05006, République de Corée ; seongjoo@sejong.ac.kr
[3] Département d'ingénierie de convergence des drones intelligents, Université de Sejong, Séoul 05006, République de
[4] Corée Département de mobilité aérienne intelligente, Université aérospatiale de Corée, Goyang-si 10540, République de Corée * Correspondance : yjung@kau.ac .kr ; Tél. : +82-2-300-0133

Résumé : Avec les progrès de la technologie de l'intelligence artificielle, les robots mobiles autonomes ont été utilisés dans diverses applications. Dans les scénarios de conduite autonome, la classification des objets est essentielle pour la navigation du robot. Pour effectuer cette tâche, les capteurs de détection et de télémétrie par lumière (LiDAR), qui peuvent obtenir des informations sur la profondeur et la hauteur et ont une résolution plus élevée que les capteurs de détection et de télémétrie radio (radar), sont préférés aux capteurs de caméra. La méthode basée sur les piliers utilise un encodeur de caractéristiques de pilier (PFE) pour coder les nuages de points LiDAR 3D en images 2D, permettant ainsi une inférence à grande vitesse à l'aide de réseaux neuronaux convolutifs 2D. Bien que la méthode basée sur les piliers soit utilisée pour garantir la réactivité en temps réel des systèmes de conduite autonome, les recherches sur l'accélération du PFE ne sont pas activement menées, bien que le PFE consomme une quantité importante de temps de calcul au sein du système. Par conséquent, cet article propose un accélérateur matériel PFE et un modèle de classification d'objets basé sur des piliers pour les robots mobiles autonomes. Le modèle de classification d'objets proposé a été formé et testé à l'aide de 2 971 ensembles de données comprenant huit classes, atteignant une précision de classification de 94,3 %. L'accélérateur matériel PFE a été implémenté dans un réseau de portes programmables sur site (FPGA) grâce à une conception de niveau de transfert de registre, qui a permis d'obtenir une accélération 40 fois supérieure à celle du micrologiciel de l'unité à microprocesseur ARM Cortex-A53 ; le réseau de classification d'objets a été implémenté dans le FPGA en utilisant le framework FINN. En intégrant le PFE et le réseau de classification d'objets, nous avons implémenté un système d'accélération de classification d'objets en temps réel basé sur des piliers sur un FPGA avec une latence de 6,41 ms.

Mots clés : réseau de portes programmables sur site ; robot mobile autonome ; classification des objets ; encodeur de caractéristiques de pilier ; FINLANDAIS

check for updates

Référence : Park, C. ; Lee, S. ; Jung, Y. Implémentation FPGA de la classification d'objets basée sur des piliers pour les systèmes autonomes Robot mobile. Électronique 2024, 13, 3035. https://doi.org/10.3390/électronique13153035

Rédacteur académique : Nicola Lusardi

Reçu : 14 juin 2024
Révisé : 29 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les robots mobiles autonomes se déplacent en reconnaissant leur environnement et en effectuant des tâches physiques effectuées par des personnes dans le passé. Les progrès en matière de vision par ordinateur, de contrôle des robots et d'intelligence artificielle (IA) ont amélioré la capacité des robots mobiles autonomes à percevoir et à réagir à leur environnement. Par conséquent, ces robots sont utilisés dans plusieurs domaines de la vie humaine, notamment la fabrication, les transports, les soins de santé et la vie quotidienne [1,2]. La classification des objets est essentielle pour les robots mobiles autonomes pour identifier les objets et planifier les trajets [3].

Différents types de capteurs, tels que des caméras et des capteurs de détection et de télémétrie radio (radar), ont été utilisés pour percevoir l'environnement dans des situations de conduite autonome. Les capteurs des caméras ne peuvent pas obtenir d'informations sur la profondeur, ce qui rend impossible la détermination précise de la distance par rapport à un objet, ce qui peut entraîner de graves problèmes lorsque les deux objets se chevauchent [4]. De plus, les capteurs des caméras sont sensibles à la luminosité et ont une portée limitée.

Machine Translated by Google

champ de vision, ce qui entraîne des contraintes opérationnelles [3]. Les capteurs radar ne peuvent pas déterminer les informations sur la hauteur des objets et ont une très faible résolution pour les angles, empêchant l' observation précise des objets [5]. En revanche, les nuages de points acquis par les capteurs de détection et de télémétrie de la lumière (LiDAR) contiennent des informations de coordonnées physiques 3D qui permettent l'acquisition d'informations sur la profondeur et la hauteur des objets. De plus, les contraintes opérationnelles sont moindres et la haute résolution permet une observation précise des objets [3]. L'utilisation de nuages de points acquis par les capteurs LiDAR est donc privilégiée pour la conduite autonome.

Divers algorithmes d'apprentissage profond sont disponibles pour traiter les nuages de points. MVCNN [6] projette un nuage de points dans plusieurs directions et classe les objets à l'aide d'un réseau neuronal convolutif (CNN) basé sur les images projetées. Bien qu'il utilise une méthode simple pour convertir les données 3D en images 2D et utiliser un CNN, une perte d'informations se produit pendant le processus de projection [7]. PointNet [8] est un réseau invariant par permutation conçu en utilisant une fonction de symétrie pour gérer des ensembles de points non ordonnés. VoxelNet [9] code les caractéristiques voxel par voxel à l'aide de PointNet et effectue des inférences à l'aide d'un réseau de proposition de région. L'inférence étant basée sur un CNN 3D, un long temps d'inférence de 225 ms est requis [10]. SECOND [11] a obtenu une vitesse d'inférence améliorée de 50 ms en appliquant un CNN clairsemé à VoxelNet, mais la complexité du calcul du CNN 3D est restée élevée. PointPillars [12] a proposé une méthode basée sur des piliers pour coder des nuages de points 3D en images 2D. Contrairement à MVCNN, qui utilise uniquement les informations de l'élément le plus élevé, la méthode basée sur les piliers utilise les informations de tous les points du pilier. La réalisation d'une inférence basée sur CNN 2D sur une image codée permet aux méthodes basées sur des piliers d'obtenir une inférence à grande vitesse et d'excellentes performances [13-16].

Les robots mobiles autonomes doivent disposer d'un temps de réponse en temps réel pour éviter les accidents physiques. Sous ces contraintes, l'exécution de méthodes basées sur des piliers basées sur des unités à microprocesseur (MPU) prend extrêmement de temps [17]. Les unités de traitement graphique (GPU) peuvent accélérer l'inférence basée sur les CNN 2D ; cependant, l'utilisation de GPU sur des appareils de pointe est inefficace en termes de consommation d'énergie [18]. Par conséquent, les réf. [19-21] ont implémenté un accélérateur matériel pour les méthodes basées sur des piliers utilisant un réseau de portes programmables par l'utilisateur (FPGA). Cependant, un encodeur de caractéristiques pilier (PFE) a été calculé sur un MPU dans [19], nécessitant 71,2 ms et représentant 19 % du temps de réponse total. De même, un PFE a été calculé sur un MPU en 9,51 ms dans [20], soit 22 % du temps de réponse total. De plus, une partie du PFE a été accélérée dans [21], nécessitant 37,7 ms pour le calcul, ce qui représentait 59 % du temps de réponse total. Étant donné que le PFE occupe une partie importante du temps de réponse global de la méthode basée sur les piliers, un accélérateur matériel pour le PFE est utile.

La méthode basée sur les piliers peut effectuer une inférence sur une image codée par le PFE avec un réseau basé sur un CNN séparable en profondeur (DSCNN). Le DSCNN utilisé dans [22-24] a été largement adopté dans les modèles CNN récents en raison de son faible coût de calcul et de son nombre de paramètres. En raison de ces avantages, les DSCNN sont souvent utilisés dans des applications à ressources limitées ou sensibles à la latence [25]. De plus, malgré leur faible complexité , ils ont montré de bonnes performances dans les modèles de classification d'images en améliorant l'efficacité de la représentation [26].

Dans cette étude, nous proposons un modèle efficace de classification d'objets basé sur des piliers pour les robots mobiles autonomes utilisant un PFE et un DSCNN, atteignant une précision de classification de 94,3 % grâce à la formation et à la validation avec des ensembles de données acquis à l'aide d'Ouster OS1-32 [27]. De plus, nous proposons un système d'accélération basé sur FPGA pour le fonctionnement en temps réel du modèle de classification d'objets proposé. Le système d'accélération proposé comprend un accélérateur PFE et un accélérateur de réseau de classification. Nous avons conçu l'accélérateur PFE pour atteindre un temps de calcul de 0,23 ms et confirmé des performances d'accélération 40 fois supérieures à celles du MPU. Un accélérateur de réseau de classification a été implémenté sur un FPGA utilisant FINN. Pour un fonctionnement dans des environnements Edge, nous avons implémenté le système d'accélération proposé sur un FPGA et confirmé un temps de réponse en temps réel

Le reste de cet article est structuré comme suit. La section 2 donne un aperçu du système d'accélération proposé, y compris la classification basée sur le PFE et le DSCNN.

Machine Translated by Google

réseaux, ensemble de données utilisé, configuration du modèle et résultats de l'évaluation. La conception du système d'accélération proposé est décrite dans la section 3. La section 4 présente la mise en œuvre résultats et effets d'accélération. Enfin, la section 5 conclut l'étude.

2. Système proposé

La figure 1 montre un aperçu du système d'accélération proposé. Le nuage de points l'entrée dans le système est codée en image par le PFE en trois étapes : (a) conversion le nuage de points en un ensemble d'unités piliers, (b) l'ajout de fonctionnalités artisanales (HCF), et (c) étendre les fonctionnalités par convolution ponctuelle (PW), en les compressant via un opération max-pool, et en les dispersant vers leur position d'origine sur le plan x – y pour générer une image. L'image générée est ensuite introduite dans un réseau de classification pour classer les objets. Le réseau de classification comprend un réseau basé sur DSCNN.

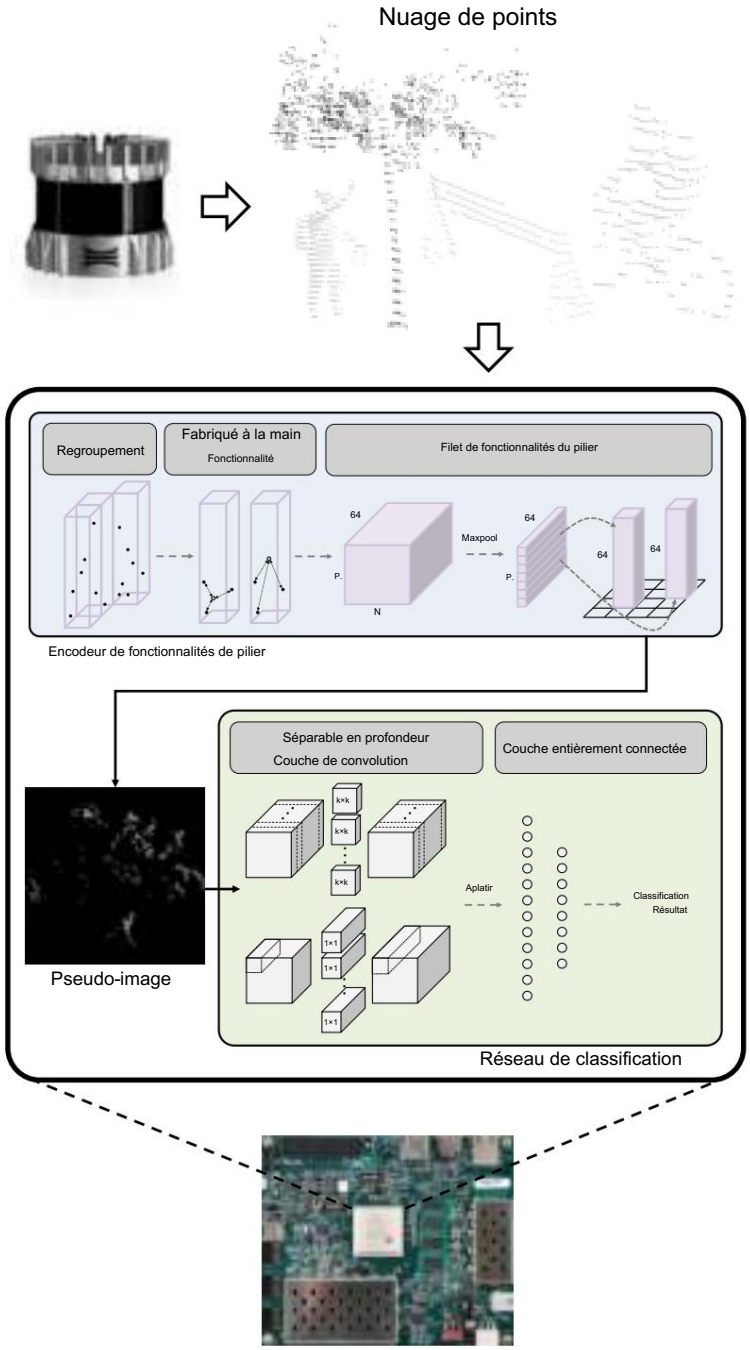


Figure 1. Aperçu du système d'accélération proposé.

Machine Translated by Google

2.1. PFE

Le PFE, qui code des nuages de points 3D en images 2D pour permettre une inférence basée sur CNN 2D , a été proposé dans [12]. Tout d'abord, une grille est générée en discrétisant le plan x – y , puis le nuage de points est converti en un ensemble d'unités piliers. L'ensemble de nuages de points g est défini par l'équation (1).

$$g = [p1 , p2 , \ldots pi , \ldots pp] \quad (1)$$

Nous définissons g comme un ensemble de pi , où P est le nombre maximum de piliers contenant des points. Nous définissons pi tel que défini par l'équation (2).

$$pi = [n1, n2, \ldots niais , \ldots nN] \quad (2)$$

Nous définissons pi comme un ensemble de nj , où N est le nombre maximum de points qu'un pilier peut contenir. L'ensemble nj est défini comme dans l'équation (3).

$$ni = [x, y, z,r] \quad (3)$$

L'ensemble nj comprend les coordonnées x, y, z et les valeurs de réflectivité des points. Enfin, le nuage de points est représenté par un tenseur de taille (P, N, 4), où P et N sont des hyperparamètres. Si le nombre de points d'un pilier est supérieur ou égal à N, un échantillonnage aléatoire est utilisé ; s'il est inférieur à N, un remplissage nul est utilisé.

Une fois le nuage de points converti en un ensemble d'unités piliers, un HCF est ajouté à l'ensemble nj . Le HCF comprend les différences xm, ym , zm entre les coordonnées moyennes arithmétiques des points à l'intérieur du pilier et les coordonnées x, y, z de chaque point, et les différences xc, yc entre les coordonnées centrales du pilier et les coordonnées x, y. coordonnées de chaque point. Le réglage nj avec le HCF ajouté est donné par l'équation (4).

$$ni = [x, y, z,r, xm, ym, zm, xc, yc] \quad (4)$$

Un tenseur de taille (P, N, 9) avec un HCF ajouté subit une convolution PW, une normalisation par lots et une couche ReLU pour le transformer en un tenseur de taille (P, N, 64). Par la suite, un regroupement maximum est appliqué le long de la deuxième dimension pour produire un tenseur de taille (P, 64).

Enfin, chaque pilier est rediffusé vers le plan x – y d'origine , complétant ainsi les données d'image 2D avec 64 canaux.

2.2. Réseau de

classification Le réseau de classification proposé est basé sur le DSCNN. La figure 2 montre le fonctionnement du DSCNN. Le DSCNN comprend les méthodes en profondeur (DW) et PW. Dans DW, le nombre de canaux dans l'image d'entrée, les filtres et les canaux dans l'image de sortie sont les mêmes. Chaque filtre n'a qu'un seul canal et effectue une opération de convolution sur un seul canal dans l'image d'entrée pour créer une image de sortie à un seul canal. Par exemple, dans la convolution DW illustrée à la figure 2, un canal de l'image d'entrée, séparé par une ligne pointillée, subit une opération de convolution avec un filtre pour produire un canal de l'image de sortie, également séparé par une ligne pointillée. Soit iC le nombre de canaux dans l'image d'entrée et oC le nombre de canaux dans l'image de sortie ; PW utilise des filtres oC de taille 1 × 1 avec des canaux iC . Chaque filtre effectue une opération de convolution sur tous les canaux de l'image d'entrée pour créer un canal de l'image de sortie. Par exemple, dans la convolution PW illustrée à la figure 2, un pixel de l'image d'entrée, séparé par une ligne pointillée, complète un pixel de l'image de sortie, séparé par une ligne pointillée, en appliquant tous les filtres dans l'opération de convolution.

Machine Translated by Google

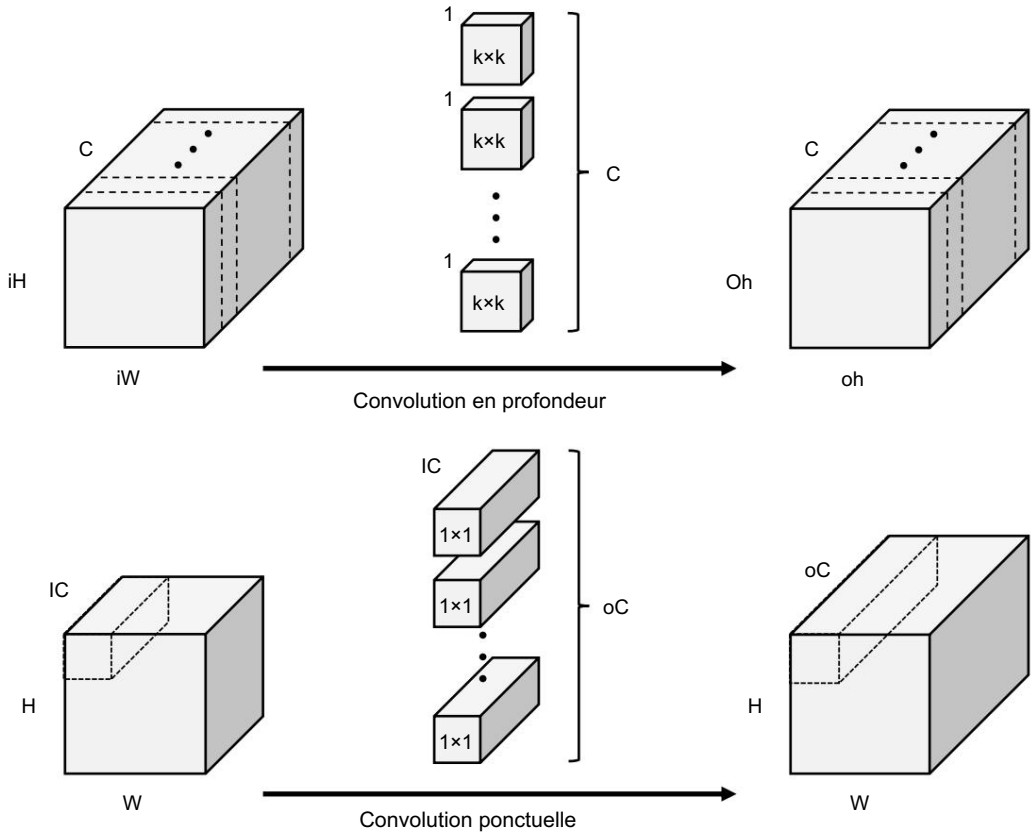


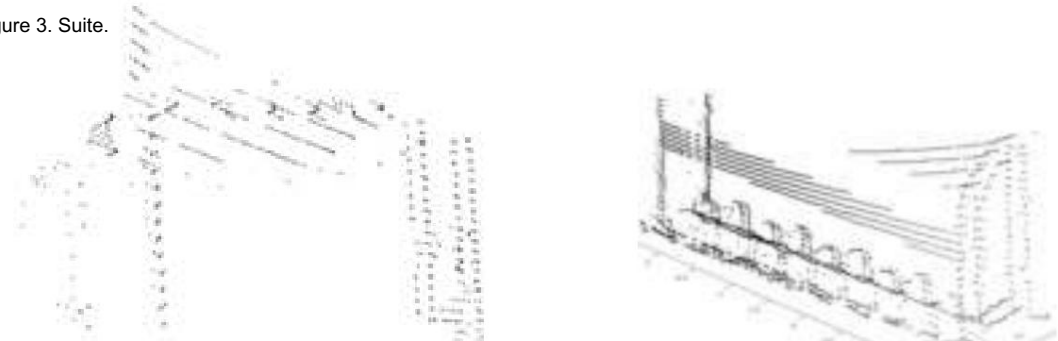
Figure 2. Mécanisme de fonctionnement du DSCNN.

2.3. Base de données

Pour entraîner le modèle de classification d'objets proposé, nous avons obtenu des nuages de points à l'aide d'un capteur Ouster OS1-32. La figure 3 illustre des exemples tirés d'un ensemble de données comprenant des objets généralement rencontrés par les robots mobiles autonomes dans leurs environnements de conduite. Pour améliorer la qualité de la formation, nous avons augmenté l'ensemble de données en utilisant des échantillons de l'ensemble de données nuScenes [28] . L'ensemble de données comprend des classes telles que le bâtiment, l'arbre, le véhicule, le vélo, l'obstacle, la verdure , la personne et l'équipement urbain (éclairage public, porte-vélos, feu de circulation, etc.), comme le montre la figure 4, qui montre la configuration de l'ensemble de données. Sur un total de 2 971 points de données, 2 617 ont été utilisés pour la formation et 354 pour la validation.



Figure 3. Suite.



Machine Translated by Google

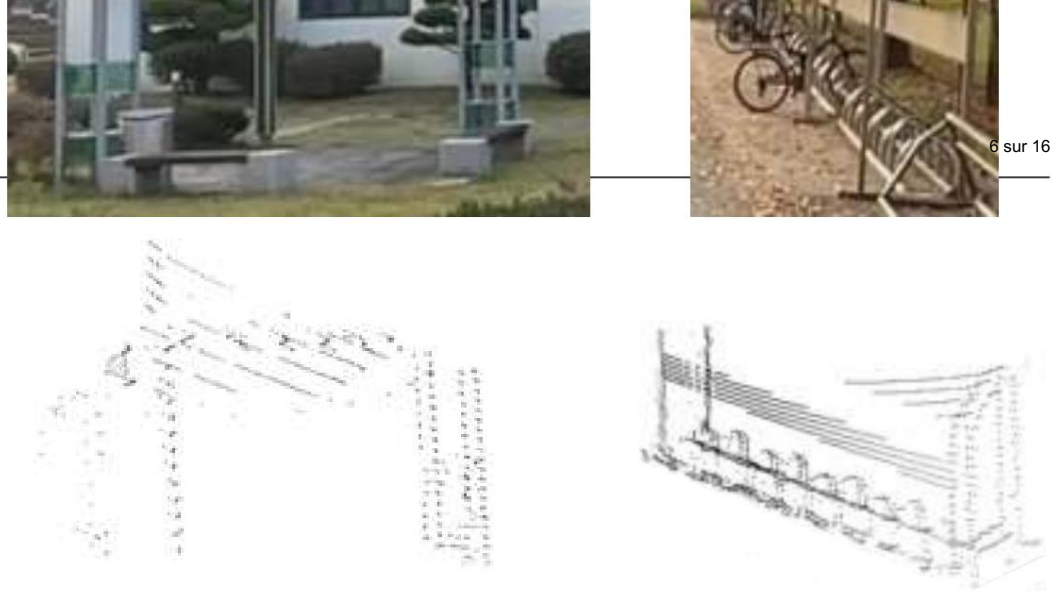


Figure 3. Exemples d'ensemble de données.

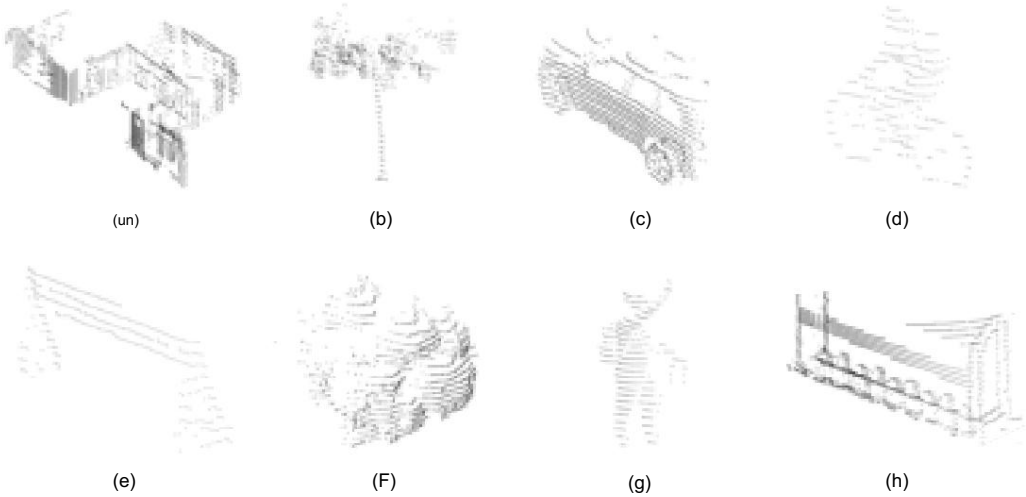


Figure 4. Configuration des classes d'ensembles de données : (a) bâtiment ; (b) arbre; (c) véhicule ; (d) vélo; (e) obstacle ; (f) la verdure; (g) personne ; (h) mobilier urbain.

2.4. Évaluation des performances

Dans le PFE, la taille de l'image, le nombre de piliers et le nombre de points par pilier sont hyperparamètres qui influencent de manière significative à la fois les performances et la complexité du modèle. La taille de l'image détermine la résolution et les dimensions de l'image codée. Une taille d'image plus grande donne des images de plus haute résolution ; cependant, cela augmente également le demande de calcul du CNN. De même, augmenter le nombre de piliers et de points par pilier permet de capturer des informations plus détaillées à partir du nuage de points. Cependant, cela augmente également la charge de calcul du PFE en raison du nombre accru de calculs nécessaires pour traiter un plus grand nombre de données. Ainsi, trouver un équilibre La combinaison de ces hyperparamètres est cruciale pour atteindre à la fois des performances élevées et calcul efficace dans les modèles de classification d'objets basés sur des piliers.

La figure 5 illustre les architectures des réseaux utilisés pour l'évaluation des performances , qui étaient toutes basées sur le DSCNN. Le tableau 1 présente les précisions correspondant à divers hyperparamètres et structures de réseau, la précision globale servant de une métrique d'évaluation pour la classification des objets. Nous avons formé 300 époques avec une taille de lot de 16, et les résultats des époques les plus performantes sont présentés dans le tableau 1. La formation a été réalisé avec un taux d'apprentissage de 0,001 et un taux de perte de poids de 0,0001. D'abord, il a été observé que les réseaux 1 et 5 présentaient des performances inférieures à celles des réseaux 2, 3, et 4. Parmi les réseaux 2, 3 et 4, le réseau 4 se distingue par ses performances équilibrées, démontrant une précision comparable à celle des réseaux 2 et 3, tout en offrant une complexité de calcul inférieure et moins de paramètres. De plus, la taille de l'image de 128 × 128 affichée performances exceptionnelles, alors que les performances étaient comparables lorsque le nombre de piliers était de 1024 et 512. La meilleure performance a été obtenue lorsque 16 points étaient à l'intérieur

Machine Translated by Google

chaque pilier. Par conséquent, le modèle de classification d'objets proposé a adopté une taille d'image de 128 × 128, 512 piliers et 16 points au sein de chaque pilier, avec le réseau de classification structuré selon le Réseau 4.

Tableau 1. Précision du modèle par divers hyperparamètres et réseaux.

Hyperparamètre			Réseau				
Taille de l'image	Nombre des piliers	Nombre de Points par pilier	1	2	3	4	5
256 × 256	2048	32	91,8%	93,5%	93,5%	92,9%	89,7%
		16	92,9%	92,9%	92,4%	92,4%	88,0%
		8	92,9%	92,9%	92,9%	92,4%	89,7%
	1024	32	92,4%	92,4%	91,8%	92,9%	89,1%
		16	92,4%	92,9%	92,4%	92,9%	90,2%
		8	93,5%	93,5%	92,4%	92,4%	89,7%
	512	32	92,4%	92,9%	93,5%	93,5%	89,7%
		16	92,9%	94,0%	92,4%	93,5%	89,7%
		8	94,6%	92,9%	92,4%	91,8%	90,8%
128 × 128	1024	32	90,8%	91,8%	92,4%	94,6%	90,8%
		16	90,8%	94,6%	92,9%	92,4%	91,3%
		8	90,8%	91,8%	91,8%	94,0%	91,8%
	512	32	90,8%	94,0%	91,8%	93,5%	92,4%
		16	91,3%	92,9%	93,5%	94,6%	92,9%
		8	90,8%	93,5%	91,8%	92,9%	92,4%
	256	32	91,8%	93,5%	92,9%	91,8%	90,8%
		16	90,8%	92,9%	92,4%	91,3%	90,8%
		8	90,8%	94,0%	94,0%	92,4%	91,3%
64 × 64	512	32	89,7%	89,7%	92,9%	91,8%	91,3%
		16	88,6%	90,2%	93,5%	91,8%	91,8%
		8	88,6%	90,8%	92,9%	92,4%	92,4%
	256	32	88,6%	90,2%	93,5%	90,8%	90,8%
		16	87,5%	89,7%	93,5%	91,8%	91,8%
		8	87,5%	90,8%	93,5%	91,8%	90,8%
	128	32	88,6%	89,1%	89,7%	90,8%	89,7%
		16	89,1%	90,2%	91,3%	90,2%	90,8%
		8	86,4%	92,4%	91,3%	89,1%	91,8%

Le tableau 2 présente une comparaison des performances entre le réseau de classification proposé et les autres réseaux de classification de cette étude. Le classement proposé Le réseau a atteint la précision de classification la plus élevée de 94,6 % sur la base du DSCNN, avec un un petit nombre d'opérations de multiplication-accumulation (MAC) de 37 M et un petit nombre de paramètres de 50,8 K.

Machine Translated by Google

Tableau 2. Comparaison des performances avec d'autres réseaux.

Réseau	Précision	Nombre de MAC	Nombre de paramètres
LeNet	92,2%	787,6 millions	2,0 millions
ResNet18	83,8%	1,4G	11,4 millions
ResNet34	82,3%	2,0G	21,5 millions
MobileNet	85,7%	128,3 millions	3,2 millions
Les notres	94,6%	37,0 millions	50,8 Ko

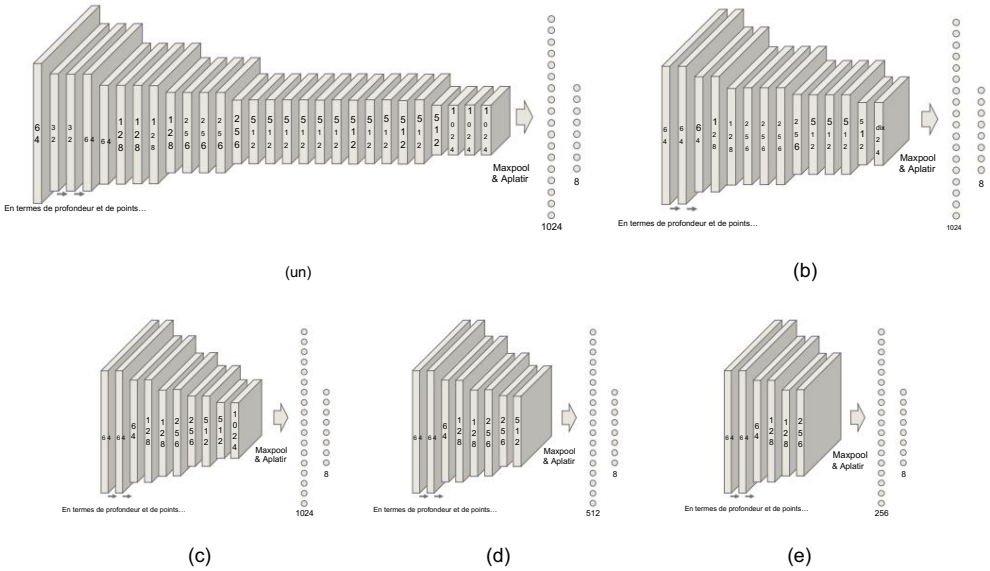


Figure 5. Architecture du réseau de classification d'objets basé sur DSCNN : (a) Réseau 1 ; (b) Réseau 2 ; (c) Réseau 3 ; d) Réseau 4 ; (e) Réseau 5.

3. Mise en œuvre du système d'accélération

Le système d'accélération proposé a été implémenté sur un FPGA en intégrant la propriété intellectuelle (IP) de l'accélérateur matériel PFE et l'IP de l'accélérateur matériel du réseau de classification avec un MPU. La section 3.1 présente la largeur de bit de chaque IP obtenue grâce à des expériences de quantification. La section 3.2 décrit la structure et le fonctionnement du système d'accélération proposé. La section 3.3 décrit la structure et le comportement de l'accélérateur matériel PFE, et la section 3.4 décrit le FINN utilisé pour implémenter l' accélérateur matériel du réseau de classification d'objets.

3.1. Quantification

Dans cette étude, nous avons quantifié le modèle de classification d'objets proposé pour implémenter le système d'accélération proposé dans le matériel. Pour minimiser la réduction des performances due aux erreurs causées par la quantification, nous avons effectué une formation prenant en compte la quantification (QAT). Les résultats des expériences utilisant différents formats de bits pour le PFE et les réseaux de classification sont répertoriés dans le tableau 3. Le PFE est plus précis avec 16 et 32 bits qu'avec 8 bits, mais il n'y a aucune différence de précision entre 16 et 32 bits. Nous avons donc décidé d'utiliser un format 16 bits pour le PFE. Le réseau de classification d'objets a montré une plus grande précision avec 4 et 8 bits, mais il n'y avait aucune différence de performances ; nous avons donc utilisé 4 bits.

Machine Translated by Google

Tableau 3. Précision selon le format binaire des réseaux PFE et classification.

PFE	Réseau de classification		
	2	4	8
8	90,3%	91,7%	92,3%
16	89,7%	94,3%	94,3%
32	88,7%	92,7%	94,3%

3.2. Architecture du système

La figure 6 montre la structure du système d'accélération proposé. Pour valider le système dans un environnement FPGA, les accélérateurs ont été intégrés à un MPU via un interconnexion d'interface extensible avancée (AXI) et implémentée dans un FPGA. Chaque IP d'accélérateur est esclave du MPU, et le MPU envoie les adresses DRAM de début et de fin qui l'IP auquel accédera, le nombre de mots à lire dans la DRAM, les paramètres du protocole AXI, et des signaux de démarrage et d'arrêt aux registres esclaves de l'IP. L'IP agit en tant que maître de la DRAM, générer des adresses de lecture et d'écriture via son interface principale pour récupérer les données requises de la DRAM pendant le calcul et réécrivez les résultats dans la DRAM.

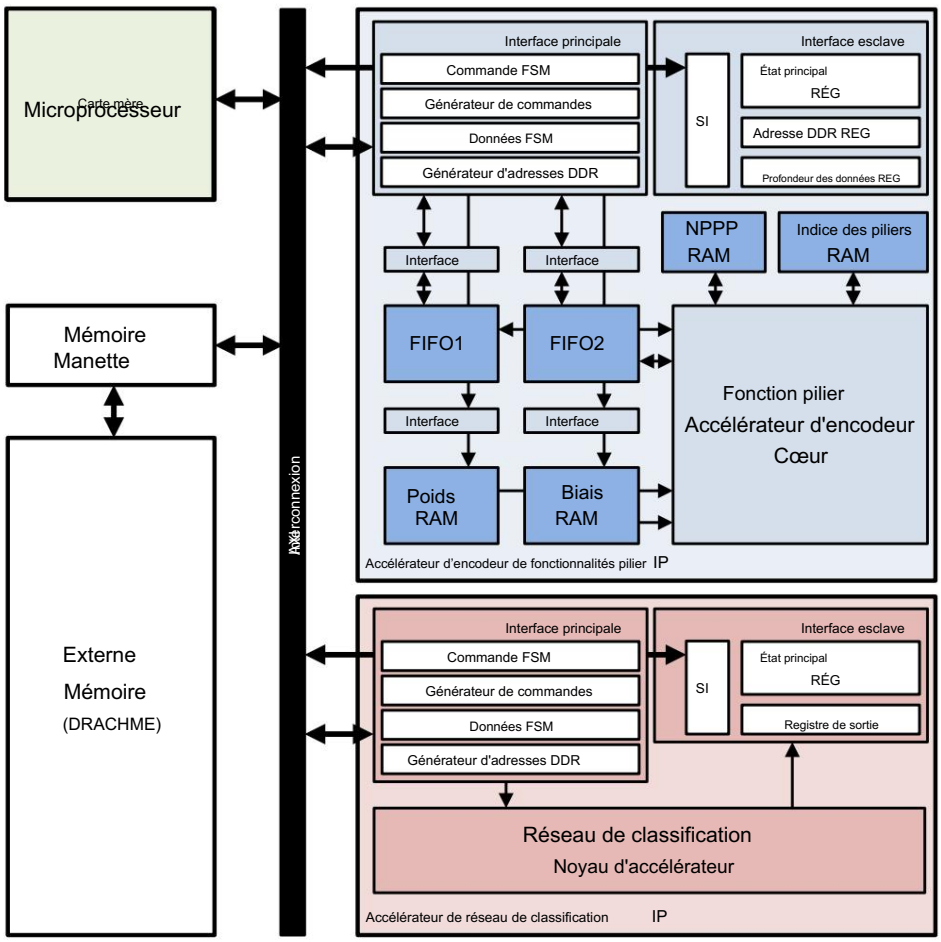


Figure 6. Architecture du système d'accélération proposé sur FPGA.

Le MPU définit d'abord le registre esclave de l'IP de l'accélérateur PFE, qui commence par lire le nuage de points de la DRAM via l'interface principale pour organiser le nuage de points en piliers. L'accélérateur PFE vérifie les coordonnées du nuage de points et stocke le point nuage en FIFO1 les uns après les autres. Pour stocker le nuage de points dans la DRAM pilier par pilier, il génère les adresses DRAM et les stocke dans FIFO2. Lorsque toutes les adresses DRAM

Machine Translated by Google

pour le nuage de points sont générés et stockés dans FIFO2, l'interface principale fait référence à FIFO1 et FIFO2 pour stocker le nuage de points à un emplacement approprié dans la DRAM.

L'accélérateur PFE organise l'ensemble du nuage de points en piliers en le stockant de manière appropriée dans la DRAM, puis relit le nuage de points et le stocke dans FIFO1 et FIFO2. Il lit également les poids et les biais pour effectuer une convolution PW à partir de la DRAM et les stocke dans la mémoire de poids (WM) et la mémoire de biais (BM). Après avoir ajouté le HCF au nuage de points, une convolution PW est effectuée pour étendre les fonctionnalités et une opération de pool maximum est effectuée. Ainsi, un pilier est codé avec 64 caractéristiques, soit un pixel avec 64 canaux dans une image 2D. Le pixel codé est stocké dans la DRAM en tenant compte de sa position.

Une fois que l'accélérateur PFE a encodé tous les nuages de points en images 2D, le MPU définit le registre esclave de l'IP de l'accélérateur de réseau de classification et démarre l'accélérateur pour lire les images de la DRAM via l'interface principale. Une fois que l'accélérateur du réseau de classification a lu toutes les images et effectué tous les calculs, il écrit les résultats de la classification dans le registre esclave. Le MPU termine le fonctionnement du système en accédant au registre esclave de l'accélérateur de réseau de classification IP et en lisant les résultats de classification.

3.3. Architecture matérielle PFE

La figure 7 montre un schéma fonctionnel de l'accélérateur PFE. L'accélérateur PFE proposé comprend une unité de regroupement (GU), une unité HCF (HU), une unité PFN (PU) et huit mémoires. Les mémoires sont FIFO1, FIFO2, tampon de nombre de points par pilier (NPPP) (NB), tampon d'index de pilier (PB), tampon HCF1 (HB1), HB2, WM et BM. HB1 et HB2 sont utilisés dans un schéma de ping-pong par le HU et le PU au sein d'une structure pipeline. Pendant que le HU fonctionne, il écrit les résultats dans HB1, tandis que le PU accède simultanément aux données de HB2. Par la suite, le HU passe à l'écriture des résultats de calcul dans HB2, tandis que le PU utilise les données stockées dans HB1 pendant cette phase.

Les nuages de points sont stockés dans FIFO1 dans l'ordre, et le localisateur de grille dans le GU vérifie les coordonnées des points pour obtenir les coordonnées des piliers contenant les points. Par exemple, si la largeur d'une cellule de grille est une valeur entière de 25, le pilier , les coordonnées du contenant un point peut être déterminé en divisant les coordonnées du point par 25, l'opération de division est . Ce remplacée par une opération de décalage vers la droite de 5 bits. Les coordonnées des piliers servent d'adresse de lecture du NB pour déterminer le NPPP. Si le NPPP est égal à 0, un nouveau pilier est créé ; ainsi, le compteur du pilier est incrémenté de un, et la valeur est écrite dans le PB pour être utilisée comme index du pilier. Si le NPPP est inférieur à 16, il est incrémenté de 1 et réécrit au NB ; sinon, il reste inchangé. L'adresse est générée en utilisant l'indice de pilier multiplié par 16 (le NPPP maximum) comme compensation, puis en ajoutant le NPPP à cette compensation. L'adresse générée est stockée dans FIFO2. Avec le nuage de points dans FIFO1 et l'adresse DRAM dans FIFO2, le nuage de points est stocké au bon endroit dans la DRAM.

Une fois que tous les nuages de points sont stockés dans la DRAM dans les piliers, ils sont relus dans FIFO1 et FIFO2. Dans FIFO2, l'adresse d'écriture DRAM est stockée pendant l' opération de regroupement, tandis que les données de lecture DRAM sont stockées à d'autres moments. L'accélérateur PFE effectue ensuite des calculs sur tous les nuages de points de manière pilier. L'unité de moyenne (AU) du HU additionne les coordonnées x, y et z de tous les points du pilier et est divisée par le NPPP pour obtenir les coordonnées moyennes arithmétiques des points. L'unité de décalage dans l'HU calcule xm, ym , zm en soustrayant les coordonnées centrales des points obtenus à partir de l'UA des coordonnées x, y, z de chaque point, et xc, yc en soustrayant les coordonnées centrales du pilier du Coordonnées x, y de chaque point. Les x, y, z, r, xm, ym , zm, xc, yc des points avec le HCF ajouté sont ensuite stockés dans le HB.

Machine Translated by Google

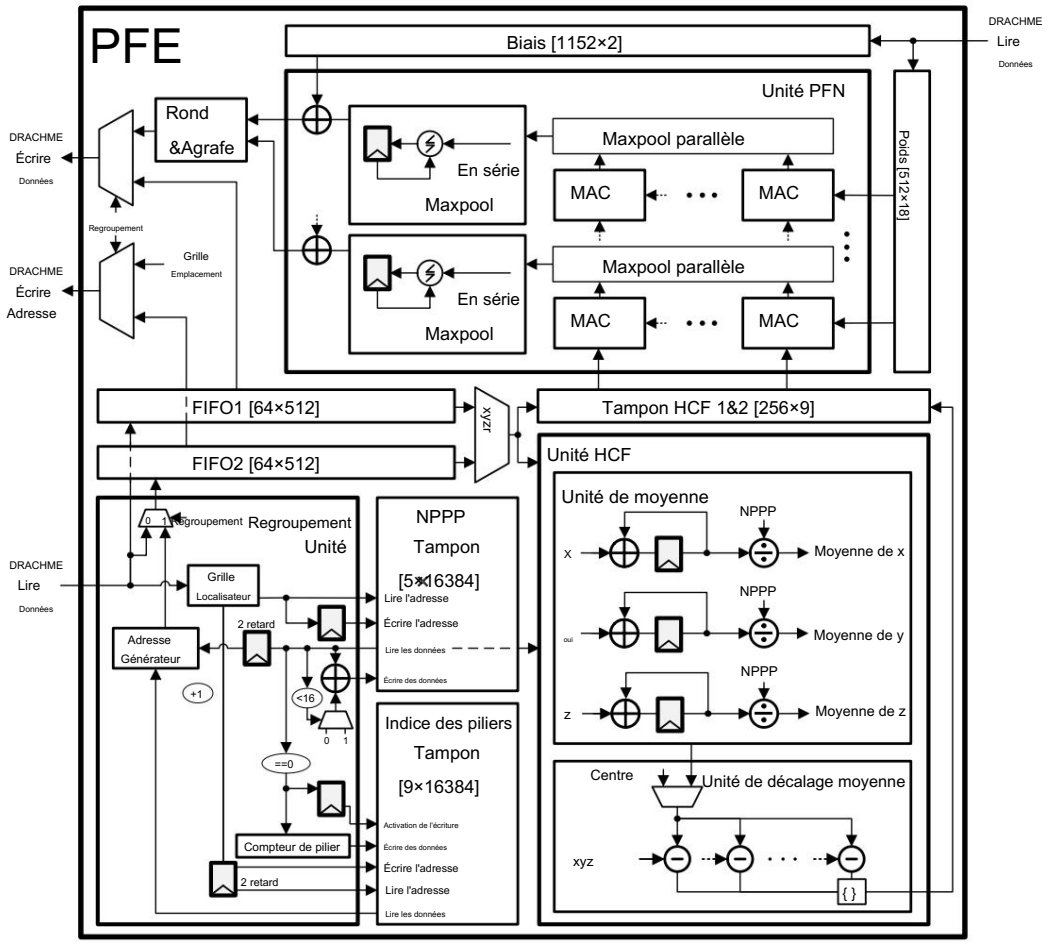


Figure 7. Schéma fonctionnel de l'accélérateur PFE.

La figure 8a montre l'opération au niveau du tenseur effectuée par le PU. Le PU exécute les opérations de convolution PW, de normalisation par lots, de pool maximum et de ReLU sur le HCF. Les poids et biais de la normalisation par lots peuvent être combinés avec ceux de la couche de convolution PW. Dans la convolution PW, seuls les poids sont utilisés et les biais sont ajoutés après une opération ReLU biaisée, qui seuille les valeurs à -bias au lieu de 0.

La figure 8b représente le fonctionnement de la figure 8a au niveau matriciel. Le PU effectue la multiplication de la matrice HCF de taille (16, 9) et de la matrice de poids de taille (9, 64) à l'aide d'un tableau MAC 8 × 32. Pour ce faire, la matrice HCF est divisée en deux matrices de taille (8, 9), et la matrice de poids est divisée en deux matrices de taille (9, 64), effectuant la multiplication matricielle entière en quatre parties. Par exemple, la multiplication matricielle de la tuile HCF 2 et de la tuile de poids 1 produit la tuile de résultat 2, et ces tuiles sont regroupées au maximum pour créer la tuile 1 au maximum.

La figure 8c illustre le fonctionnement au niveau matériel du PU par ordre chronologique. Le PU lit la tuile HCF 1 et la tuile de poids 1 à partir du HB et du WM, respectivement. Le PU lit la tuile HCF 1 colonne par colonne et la tuile de poids 1 ligne par ligne sur 9 cycles, les introduisant dans le tableau MAC. Le réseau MAC traite les entrées HCF et de poids sur 9 cycles et génère la tuile de résultat 1 de taille (8, 32). La tuile de résultat 1 est ensuite traitée par l'unité de pool maximum parallèle pour effectuer des opérations de pool maximum, produisant la tuile intermédiaire 1 de taille (1, 32). Étant donné que l'unité parallèle max-pool effectue immédiatement des opérations max-pool sur la sortie du tableau MAC, elle économise des cycles et de l'espace mémoire tampon en ne stockant ni en rechargeant la tuile de résulta La tuile intermédiaire 1 est comparée à la valeur -bias dans l'unité série max-pool, et la plus grande valeur est stockée dans le registre. En effectuant des opérations ReLU biaisées dans l' unité série max-pool, l'opération ReLU pourrait être intégrée à l'opération max-pool. Après avoir créé la tuile intermédiaire 1, l'unité centrale lit la tuile HCF 2 et pondère la tuile 1 pour produire la tuile intermédiaire.

Machine Translated by Google

2. La tuile intermédiaire 2 subit des opérations de pool maximum avec la tuile intermédiaire 1 stockée dans le registre de l'unité de pool maximum en série, ce qui donne la tuile 1 à pool maximum. La tuile 1 à pool maximum est d'un demi- pixel lorsque le biais est ajouté, arrondi et coupé. . Ce demi-pixel est stocké au bon endroit dans la DRAM en fonction de ses coordonnées dans l'image. Pour créer l'adresse d'écriture DRAM , la coordonnée x du pixel multipliée par la largeur de l'image est utilisée comme décalage, et la coordonnée y est ajoutée à ce décalage. Lorsque le PU a créé les deux tuiles 1 et 2 au maximum , il y a un pixel complet dans la DRAM.

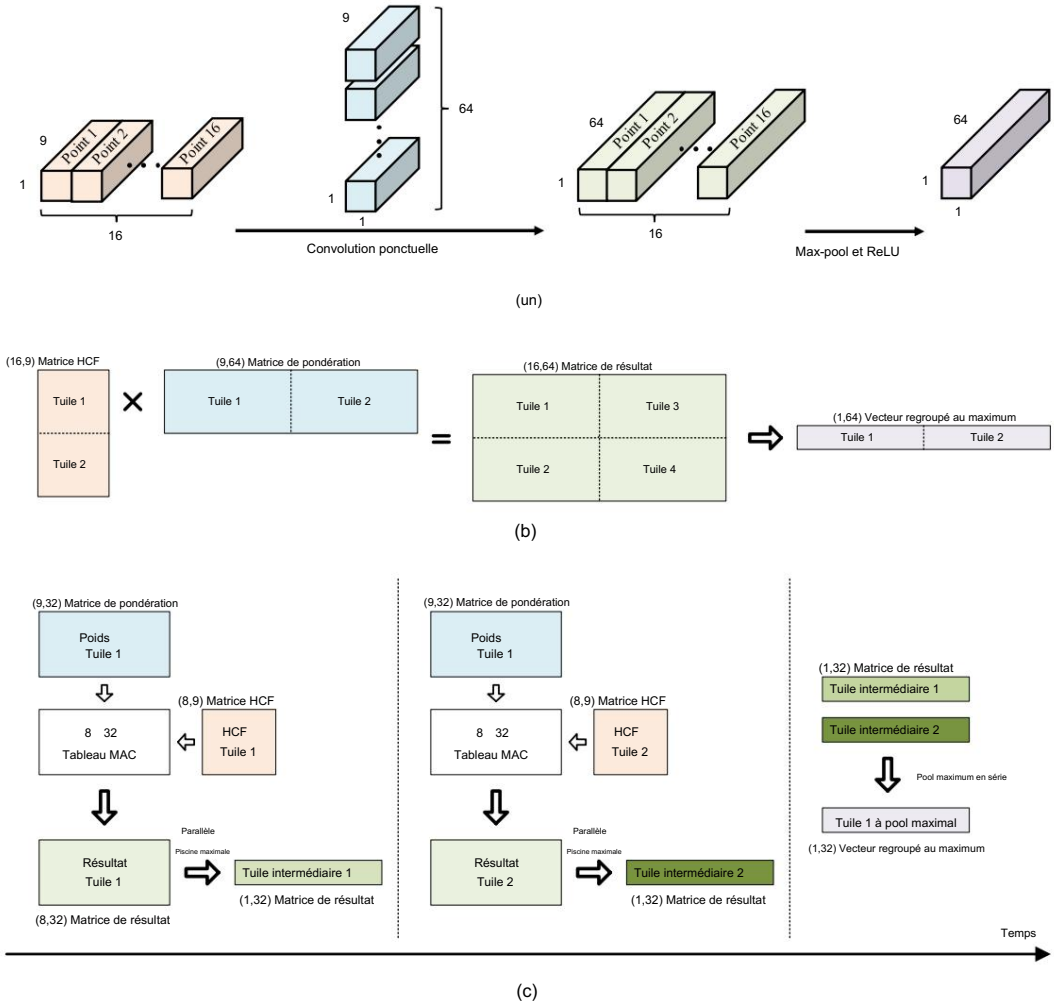


Figure 8. Fonctionnement du PU : (a) fonctionnement au niveau du tenseur ; (b) opération au niveau matriciel ; (c) fonctionnement au niveau matériel.

3.4. Accélérateur de réseau de classification utilisant FINN

Xilinx propose divers outils pour la mise en œuvre de réseaux d'apprentissage en profondeur. Vitis AI est une plate-forme utilisée pour mettre en œuvre et optimiser les applications d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique sur les FPGA et les plates-formes de systèmes sur puce adaptatives. Vitis AI prend en charge divers cadres et bibliothèques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, et génère une adresse IP d'unité de traitement d'apprentissage profond (DPU). FINN est un framework open source pour l'inférence de réseau d'apprentissage profond quantifié basée sur FPGA. FINN utilise un modèle d'échange de réseau neuronal ouvert comme entrée, optimise le réseau et génère un accélérateur matériel.

Dans cette étude, nous avons utilisé FINN pour implémenter une version matérielle d'un réseau de classification d'objets. Alors que le DPU sert d'accélérateur général pour les opérations d'apprentissage profond , FINN optimise l'architecture matérielle et le flux de données spécifiquement pour le réseau d'apprentissage profond. Par conséquent, FINN offre une latence plus faible, permet des vitesses de réponse en temps réel et peut atteindre un débit élevé en optimisant le pipeline [29]. De plus, n

Machine Translated by Google

les travaux de faible complexité, tels que le réseau de classification proposé, peuvent considérablement réduire l'utilisation des ressources matérielles. De plus, FINN prend en charge les entiers de 4 bits, offrant ainsi une avantage sur les DPU. Tirer parti des avantages de FINN, réf. [19] a implémenté un backbone couche de PointPillars en utilisant FINN.

4. Résultats de la mise en œuvre

Le système d'accélération proposé a été implémenté sur un Xilinx Zynq Ultrascale+ ZCU104 [30]. Le tableau 4 résume l'utilisation des ressources matérielles et la fréquence de fonctionnement du système d'accélération proposé. Le système d'accélération proposé a utilisé 75 548 Tables de recherche (LUT) de blocs logiques configurables (CLB), 56 931 registres CLB, 374 signaux numériques processeurs (DSP) et 65 blocs de RAM. La fréquence de fonctionnement était de 187,5 MHz, ce qui permet un fonctionnement à grande vitesse et le temps de réponse de la classification d'objet proposée le système était de 6,41 ms.

Tableau 4. Ressources matérielles du système de classification d'objets proposé.

Unité	BEC LUT	BEC Registres	DSP	Bloc RAM	Fréquence (MHz)
PFE	35 567	28 513	302	10.5	
Réseau de classification	34 788	21 625	72	54,5	
Interconnexion AXI	5193	6793	0	0	
Total	75 548	56 931	374	65	187,5

Le tableau 5 compare les temps de réponse de la mise en œuvre du PFE basé sur le micrologiciel sur un ARM Cortex A53 (de base) fonctionnant à 1,2 GHz et le matériel PFE proposé accélérateur (proposé) en termes de temps d'exécution pour chaque opération. Le regroupement opération, chargée de convertir un nuage de points en un ensemble d'unités piliers, expérimentée une accélération remarquable de 23,67 fois, passant de 0,71 ms à 0,03 ms. Notamment, le Les opérations HCF et PFN ont atteint une accélération significative d'environ 42,6 fois, diminuant de 8,52 ms à 0,20 ms. Cette accélération notable a été rendue possible en tirant parti de la capacité de calcul parallèle du réseau MAC dans l'accélérateur PFE et du pipeline structure des opérations du HCF et du PFN. Le temps global d'exécution des opérations PFE a été réduit de 9,23 ms à 0,23 ms, démontrant un effet d'accélération 40 fois supérieur à celui avec l'implémentation basée sur le micrologiciel.

Tableau 5. Comparaison du temps de réponse du PFE avec la ligne de base.

Opération	Base de référence (micrologiciel)	Proposé (Matériel)
Regroupement	0,71 ms	0,03 ms
HCF	0,20 ms	0,20 ms
PFN	8,32 ms	
Total	9,23 ms	0,23 ms

Le tableau 6 présente une comparaison entre le système de classification des objets proposé et méthodes basées sur des piliers mises en œuvre dans des études antérieures. Dans [19–21], un système hétérogène entre le MPU et le FPGA a été construit, alors que notre système représente une implémentation matérielle de bout en bout de toutes les opérations sur un FPGA. Dans [19], calcul PFE a été effectué sur un MPU et le calcul du réseau d'apprentissage profond a été exécuté à l'aide de un accélérateur mis en œuvre via FINN. Réf. [20] ont calculé le PFE sur un MPU et exécuté un réseau d'apprentissage profond sur un accélérateur implémenté à l'aide d'un transfert de registre conception de niveau (RTL). Réf. [21] ont utilisé à la fois un MPU et un DPU pour le calcul du PFE, ainsi qu'un DPU pour le calcul de réseau d'apprentissage profond. Nous avons calculé le PFE avec un accélérateur

Machine Translated by Google

mis en œuvre via une conception RTL et un réseau d'apprentissage profond avec un accélérateur mis en œuvre via FINN.

Notre méthode a atteint le temps de réponse le plus rapide de 6,41 ms, car c'était la seule celui qui a accéléré le PFE, et le modèle de classification des objets proposé a été conçu avoir une faible complexité de calcul grâce à diverses expériences. De plus, ces les expériences ont abouti à un modèle de classification d'objets avec moins de paramètres. Notre méthode utilisé plus de DSP que celui de [19], mais beaucoup moins de LUT, de registres et de mémoire. Réf. [19] ont utilisé la même plateforme FPGA ciblant les environnements Edge que la nôtre, le ZCU104, atteindre une faible consommation d'énergie. Cependant, il consommait toujours plus d'énergie que le nôtre, qui a mis en œuvre un réseau d'apprentissage profond efficace. Par rapport à la méthode de [20], notre méthode a utilisé moins de ressources dans tous les domaines, avec des différences particulièrement notables dans DSP et utilisation de la mémoire. Réf. [20] ont également consommé peu d'énergie en mettant en œuvre un système efficace réseau d'apprentissage profond. De plus, puisque la réf. [20] a conçu le réseau d'apprentissage profond accélérateur au niveau RTL, il consommait encore moins d'énergie que le nôtre, qui a été conçu basé sur HLS. De plus, notre méthode utilisait plus de LUT mais moins de registres et de DSP, et beaucoup moins de BRAM et d'URAM que ceux de [21]. De plus, notre méthode consommé beaucoup moins d'énergie que celui de [21]. Réf. [21] a utilisé la plateforme FPGA U280 ciblant les environnements de serveur, qui avaient une consommation d'énergie beaucoup plus élevée et ne sont pas adapté aux environnements périphériques.

Tableau 6. Comparaison avec d'autres mises en œuvre basées sur des piliers.

	[19]	[20]	[21]	Les notres
Plate-forme	ZCU104	ZC706	U280	ZCU104
Calcul Appareil	Carte mère et FPGA (FINLANDAIS)	Carte mère et FPGA (RTL)	Carte mère et FPGA (DPU)	FPGA (RTL & FINN)
Exécution Temps (ms)	377.1	43.26	64.1	6.41
LUT CLB	189 074	128 721	48 006	75 548
Registres du BEC	150 187	111 118	85 801	56 931
DSP	88	883	525	374
Bloquer la RAM	159	382,5	131,5	65
Ultra-RAM	-	-	64	1
Fréquence (MHz)	150	150	300	187,5
Puissance (W)	6.5	3.6	73,8	4.4

5. Conclusions

Dans cette étude, nous proposons un modèle de classification d'objets d'apprentissage profond basé sur un méthode basée sur des piliers pour les réponses en temps réel de robots mobiles autonomes. L'object Le réseau de classification du modèle d'apprentissage profond est basé sur le DSCNN, qui a un une faible complexité et peu de paramètres, ce qui le rend adapté aux environnements de périphériques de pointe. Le modèle de classification d'objets a été formé à l'aide d'un ensemble de données prenant en compte le fonctionnement environnement de robots mobiles autonomes. Pour minimiser la réduction des performances due à la quantification, nous avons quantifié et testé le modèle à l'aide de QAT, obtenant ainsi une classification précision de 94,3%. Étant donné que le calcul du PFE dans les modèles de classification d'objets basés sur des piliers prenait beaucoup de temps, nous avons proposé un accélérateur matériel pour le PFE. Le L'accélérateur PFE a été mis en œuvre grâce à la conception RTL et a atteint un temps de réponse de 0,23 ms, soit 40 fois plus rapide que le firmware. L'accélérateur de l'objet Le réseau de classification du modèle d'apprentissage en profondeur proposé a été mis en œuvre via le FINN et a atteint un temps d'exécution de 6,18 ms. Nous avons également proposé un objet système de classification qui intègre l'accélérateur PFE proposé et la classification des objets accélérateur de réseau via une interconnexion AXI. Le système de classification des objets proposé

Machine Translated by Google

a été implémenté et vérifié sur un FPGA et a atteint un temps de réponse en temps réel de 6,41 ms.

L'accélérateur PFE proposé peut être combiné avec d'autres accélérateurs de réseau d'apprentissage profond pour accélérer des modèles d'apprentissage profond plus diversifiés. Cependant, dans cette étude, nous n'avons effectué d'accélération que sur les modèles de classification d'objets. Dans les travaux futurs, nous prévoyons de mettre en œuvre un système prenant en charge l'accélération de modèles d'apprentissage profond plus diversifiés et plus stimulants.

Contributions de l'auteur : CP a conçu et mis en œuvre le système d'accélération proposé, réalisé l'expérimentation et l'évaluation, et rédigé l'article. SL a évalué le système d'accélération proposé et révisé ce manuscrit. YJ a conçu et dirigé la recherche, analysé les résultats expérimentaux et rédigé l'article. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été soutenu par la subvention de l'Institut de planification et d'évaluation des technologies de l'information et des communications (IITP) financée par le gouvernement coréen (MSIT) (n° 2022-0-00960), et les outils de CAO ont été soutenus par l'IDEC.

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de consentement éclairé : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : ensemble de données disponible sur demande auprès des auteurs.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Varlamov, O. « Cerveaux » pour les robots : application des systèmes experts Mivar pour la mise en œuvre de systèmes intelligents autonomes Des robots. Résolution Big Data. 2021, 25, 100241. [CrossRef]
2. Liu, Y. ; Li, Z. ; Liu, H. ; Kan, Z. Apprentissage par transfert de compétences pour les robots autonomes et la coopération homme-robot : une enquête. Robot. Auton. Système. 2020, 128, 103515. [Réf. croisée]
3. Yoshioka, M. ; Suganuma, N. ; Yoneda, K. ; Aldibaja, M. Classification d'objets en temps réel pour les véhicules autonomes à l'aide du LIDAR. Dans Actes de la Conférence internationale 2017 sur l'informatique intelligente et les sciences biomédicales (ICIIBMS), Okinawa, Japon, 24-26 novembre 2017 ; pp. 210-211.
4. Gao, H. ; Cheng, B. ; Wang, J. ; Li, K. ; Zhao, J. ; Li, D. Classification d'objets utilisant la fusion de vision et LIDAR basée sur CNN dans Environnement de véhicule autonome. IEEETrans. Ind. Informer. 2018, 14, 4224-4231. [Référence croisée]
5. Zhou, Y. ; Liu, L. ; Zhao, H. ; López-Benítez, M. ; Yu, L. ; Yue, Y. Vers une perception radar approfondie pour la conduite autonome : ensembles de données, Méthodes et défis. Capteurs 2022, 22, 4208. [CrossRef] [Pub Med]
6. Su, H. ; Maji, S. ; Kalogerakis, E. ; Learned-Miller, E. Réseaux de neurones convolutifs multi-vues pour la reconnaissance de formes 3D. Dans les actes de la conférence internationale de l'IEEE sur la vision par ordinateur, Santiago, Chili, 7-13 décembre 2015 ; pp. 945-953.
7. Hoang, L. ; Lee, SH; Lee, EJ ; Kwon, KR GSV-NET : un réseau d'apprentissage profond multimodal pour la classification des nuages de points 3D. Appl. Sci. 2022, 12, 483. [CrossRef]
8. Qi, CR ; Su, H. ; Mo, K. ; Guibas, LJ Pointnet : Deep Learning sur les ensembles de points pour la classification et la segmentation 3D. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pp. 652-660.
9. Zhou, Y. ; Tuzel, O. Voxelnet : Apprentissage de bout en bout pour la détection d'objets 3D basée sur un nuage de points. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Salt Lake City, UT, États-Unis, 18-22 juin 2018 ; pages 4490 à 4499.
10. Bhanushali, D. ; Relyea, R. ; Manghi, K. ; Vashist, A. ; Hochgraf, C. ; Ganguly, A. ; Kwasinski, A. ; Kuhl, MOI ; Ptucha, R. Caméra LiDAR Fusion pour la détection d'objets 3D. Électron. Imagerie 2020, 32, 1–9. [Référence croisée]
11. Yan, Y. ; Mao, Y. ; Li, B. Deuxièmement : Détection convolutive peu intégrée. Capteurs 2018, 18, 3337. [CrossRef] [Pub Med]
12. Lang, AH; Vora, S. ; César, H. ; Zhou, L. ; Yang, J. ; Beijbom, O. Pointpillars : Encodeurs rapides pour la détection d'objets à partir de nuages de points. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Long Beach, Californie, États-Unis, 15-20 juin 2019 ; pages 12697 à 12705.
13. Lis, K. ; Kryjak, T. Sélection du type de colonne vertébrale PointPillars pour une détection d'objets LiDAR rapide et précise. Dans Actes de la Conférence internationale sur la vision et le graphisme par ordinateur, Varsovie, Pologne, 19-21 septembre 2022 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2022 ; pp. 99-119.
14. Shu, X. ; Zhang, L. Recherche sur l'algorithme PointPillars basé sur un réseau fédérateur amélioré en fonctionnalités. Électronique 2024, 13, 1233. [Référence croisée]
15. Wang, Y. ; Han, X. ; Wei, X. ; Luo, J. Instance Segmentation Frustum – PointPillars : un algorithme de fusion léger pour la perception caméra-LiDAR dans la conduite autonome. Mathématiques 2024, 12, 153. [CrossRef]
16. Agashe, P. ; Lavanya, R. Détection d'objets à l'aide de PointPillars avec DarkNet53 modifié comme backbone. Dans les actes de la 20e conférence internationale du Conseil indien de l'IEEE 2023 (INDICON), Hyderabad, Inde, 14-17 décembre 2023 ; pp. 114-119.

Machine Translated by Google

17. Choi, Y. ; Kim, B. ; Kim, SW Analyse des performances de PointPillars sur les plates-formes CPU et GPU. Dans les actes de la 36e Conférence technique internationale sur les circuits/systèmes, les ordinateurs et les communications (ITC-CSCC) 2021, Jeju, République de Corée, 27-30 juin 2021 ; p. 1 à 4.

18. Silva, A. ; Fernandes, D. ; Névoa, R. ; Monteiro, J. ; Novais, P. ; Girão, P. ; Afonso, T. ; Melo-Pinto, P. Inférence intégrée aux ressources limitées de la détection et de la localisation d'objets 3D dans des nuages de points ciblant les applications de conduite autonome. Capteurs 2021, 21, 7933. [Référence croisée] [Pub Med]

19. Stanisz, J. ; Lis, K. ; Gorgon, M. Implémentation du réseau Pointpillars pour la détection d'objets 3D en reprogrammable Appareils hétérogènes utilisant FINN. J. Processus de signal. Système. 2022, 94, 659-674. [Référence croisée]

20. Li, Y. ; Zhang, Y. ; Lai, R. TinyPillarNet : réseau basé sur de petits piliers pour la détection d'objets de nuages de points 3D à la périphérie. IEEETrans. Système de circuits. Technologie vidéo. 2023, 34, 1772-1785. [Référence croisée]

21. Latotzke, C. ; Kloeker, A. ; Schöning, S. ; Kemper, F. ; Slimi, M. ; Eckstein, L. ; Gemmeke, T. Accélération basée sur FPGA du traitement et de la détection des nuages de points Lidar en périphérie. Dans les actes du Symposium IEEE sur les véhicules intelligents (IV) 2023, Anchorage, AK, États-Unis, 4-7 juin 2023 ; p. 1 à 8.

22. Tan, M. ; Le, Q. Efficientnet : Repenser la mise à l'échelle du modèle pour les réseaux de neurones convolutifs. Dans les Actes de l'Internationale Conférence sur l'apprentissage automatique. PMLR, Long Beach, Californie, États-Unis, 9-15 juin 2019 ; pages 6105 à 6114.

23. Chollet, F. Xception : Apprentissage profond avec convolutions séparables en profondeur. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pages 1251 à 1258.

24. Howard, AG; Zhu, M. ; Chen, B. ; Kalenichenko, D. ; Wang, W. ; Weyand, T. ; Andreetto, M. ; Adam, H. Mobilenets : Réseaux de neurones convolutifs efficaces pour les applications de vision mobile. arXiv 2017, arXiv :1704.04861.

25. Lu, G. ; Zhang, W. ; Wang, Z. Optimisation des opérations de convolution séparables en profondeur sur les GPU. IEEETrans. Distribution parallèle. Système. 2021, 33, 70-87. [Référence croisée]

26. Kaiser, L. ; Gomez, AN; Chollet, F. Convolutions séparables en profondeur pour la traduction automatique neuronale. arXiv 2017, arXiv : 1706.03059.

27. Expulsion. Capteur Lidar Ouster OS1. Disponible en ligne : https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor (consulté le 22 mai 2024).

28. César, H. ; Bankiti, V. ; Lang, AH ; Vora, S. ; Liong, VE ; Xu, Q. ; Krishnan, A. ; Poêle, Y. ; Baldan, G. ; Beijbom, O. nuscenes : Un ensemble de données multimodales pour la conduite autonome. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Seattle, WA, États-Unis, 14-19 juin 2020 ; pages 11621 à 11631.

29. Questions fréquemment posées sur la documentation sur l'IA de Xilinx Inc. Vitis™. Disponible en ligne : https://xilinx.github.io/Vitis-AI/3.0/html/docs/reference/faq.html#what-is-the-difference-between-the-vitis-ai-integrated-development-environment -et-le- workflow-finn (consulté le 22 mai 2024).

30. DMLA. UltraSclae+ZCU104. Disponible en ligne : https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/zcu104.html (consulté le 22 mai 2024).

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Swin-Fake : un apprentissage de cohérence basé sur un transformateur Détecteur de vidéos Deepfake

Liang Yu Gong *,†,‡ , Xue Jun Li *,†,‡ et Peter Han Joo Chong †

Département de génie électrique et électronique, Université de technologie d'Auckland, Auckland 1010, Nouvelle-Zélande ; peter.chong@aut.ac.nz *
Correspondance : liangyu.gong@autuni.ac.nz (LYG) ; xuejun.li@aut.ac.nz (XJL)
† Adresse actuelle : 6 Saint Paul Street, Auckland 1010, Nouvelle-Zélande.
‡ Ces auteurs ont participé à ce travail à part égale.

Résumé : Deepfake est devenu ces dernières années une technologie émergente affectant la cybersécurité avec ses applications illégales . La plupart des détecteurs de deepfake utilisent des modèles basés sur CNN tels que le réseau Xception pour distinguer les médias réels des faux ; cependant, leurs performances sur des ensembles de données croisées ne sont pas idéales car elles souffrent d'un surajustement au stade actuel. Par conséquent, cet article a proposé une méthode d'apprentissage de la cohérence spatiale pour résoudre ce problème sous trois aspects. Premièrement, nous avons augmenté le nombre de méthodes d'augmentation des données sélectionnées à 5, ce qui est plus que les méthodes d'augmentation des données de notre étude précédente . Plus précisément, nous avons capturé plusieurs images vidéo égales d'une vidéo et sélectionné au hasard cinq augmentations de données différentes pour obtenir différentes vues de données afin d'enrichir la variété d'entrée. Deuxièmement, nous avons choisi Swin Transformer comme extracteur de fonctionnalités au lieu d'un backbone basé sur CNN, ce qui signifie que notre approche ne l'a pas utilisé pour les tâches en aval et a pu coder ces données à l'aide d'un Swin Transformer de bout en bout, dans le but d'apprendre le corrélation entre différents patchs d'image. Enfin, cela a été combiné à un apprentissage cohérent dans notre étude, et l'apprentissage cohérent a permis de déterminer davantage de relations entre les données que la classification supervisée. Nous avons exploré la cohérence des caractéristiques des images vidéo en calculant leur distance cosinus et appliqué la perte d'entropie croisée traditionnelle pour réguler cette perte de classification. Des expériences approfondies au sein des ensembles de données et entre ensembles de données ont démontré que Swin-Fake pouvait produire des résultats relativement bons sur certains ensembles de données deepfake open source, notamment FaceForensics++, DFDC, Celeb-DF et FaceShifter. En comparant notre modèle avec plusieurs modèles de référence, notre approche montre une robustesse relativement forte dans la détecti

Mots-clés : apprentissage cohérent ; Transformateur Swin ; perte de cohérence ; détection des deepfakes

check for updates

Référence : Gong, LY ; Li, XJ ; Chong, PHJ Swin-Fake : un détecteur vidéo Deepfake basé sur un transformateur d'apprentissage de cohérence. Électronique 2024, 13, 3045. https://doi.org/10.3390/électronique13153045

Rédacteurs académiques : Petia Georgieva, Krasimir Tonchev et Agata Manolova

Reçu : 1er juillet 2024
Révisé : 26 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

La génération et la détection de Deepfake ont toutes deux continué à se développer dans un jeu attaquant-défenseur de 2019 à 2021 ; cependant, avec le développement rapide des méthodes basées sur le GAN [1,2] et des modèles de diffusion (DM) [3], les puissantes capacités génératives de ces modèles avec un post-traitement avancé, tel que le mélange des couleurs, rendent les visages synthétiques plus réalistes. .
Ainsi, il est aujourd'hui plus difficile de distinguer l'authenticité d'une seule image vidéo avec des yeux humains dans une vidéo deepfake.

Même si les détecteurs basés sur les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) [4-6] ont eu un effet remarquable sur le travail de classification des deepfakes, ils souffrent toujours d'une grande dépendance à l'égard des données d'entraînement, ce qui entraîne une baisse de la précision ou de l'aire sous la courbe (AUC). considérablement dans les expériences multi-ensembles de données. Ainsi, ces dernières années, les détecteurs de deepfake ont tendance à être conçus comme des méthodes d'apprentissage de cohérence pour explorer la cohérence spatiale ou temporelle, l'auto-cohérence ou l'incohérence entre représentations ou patchs. De plus, il a été prouvé que les transformateurs de vision [7,8] ont de solides applications, en particulier dans la classification d'images. Les détecteurs de deepfake basés sur des transformateurs deviennent courants dans ce domaine en raison de leurs mécanismes d'attention uniques qui peuvent être appliqués pour générer des informations spatiales et spati

Machine Translated by Google

caractéristiques temporelles. Comparé à d'autres Vision Transformers [9,10], Swin Transformer peut considérablement améliorer les performances de classification en définissant des mécanismes de partition de fenêtre, de décalage cyclique et de biais de position relative.

Dans cet article, nous avons proposé un cadre simple d'apprentissage de la cohérence utilisant Swin Transformer [11] comme extracteur de fonctionnalités pour extraire et apprendre explicitement la cohérence entre les images vidéo capturées. Par rapport aux détecteurs de deepfake traditionnels, notre approche contient également un bloc de prétraitement des données et un modèle de base pour l'extraction des caractéristiques, mais notre perte combine la cohérence des trames et la perte de classification. En ce qui concerne le travail de prétraitement des données, nous avons divisé une vidéo en plusieurs images en groupe pour classer les vidéos deepfake, ce qui peut être considéré comme une technique d'ensemble. Contrairement à d'autres techniques d'apprentissage d'ensemble, nous avons enrichi l'extraction de caractéristiques pour aider le modèle à apprendre différentes caractéristiques de contrefaçon avec des méthodes d'augmentation de données aléatoires et différentes. De plus, les détecteurs de deepfake traditionnels utilisent toujours certaines méthodes d'augmentation des données inchangées telles que la transformation de base et la normalisation ; cependant, pour notre bloc de prétraitement des données, nous avons choisi plusieurs méthodes avancées d'augmentation des données pour augmenter le caractère aléatoire de l'amélioration des données et prouver que peu importe le degré d'amélioration des données, la même catégorie de données peut être conservée avec une bonne cohérence. Comme le montre la figure 1, chaque vidéo a été divisée de manière égale en images pour garantir que la zone du visage est uniformément répartie sur toute la durée de la vidéo. Notre bloc de prétraitement des données contient également plusieurs augmentations de données et est appliqué de manière aléatoire sur chaque image capturée pour enrichir différentes entrées. Ensuite, un encodeur partagé basé sur Transformer extrait les représentations et calcule la similarité des paires en effectuant des combinaisons pour former une perte de cohérence. Enfin, un classificateur supervisé attribue l'étiquette à chaque caractéristique de trame extraite.

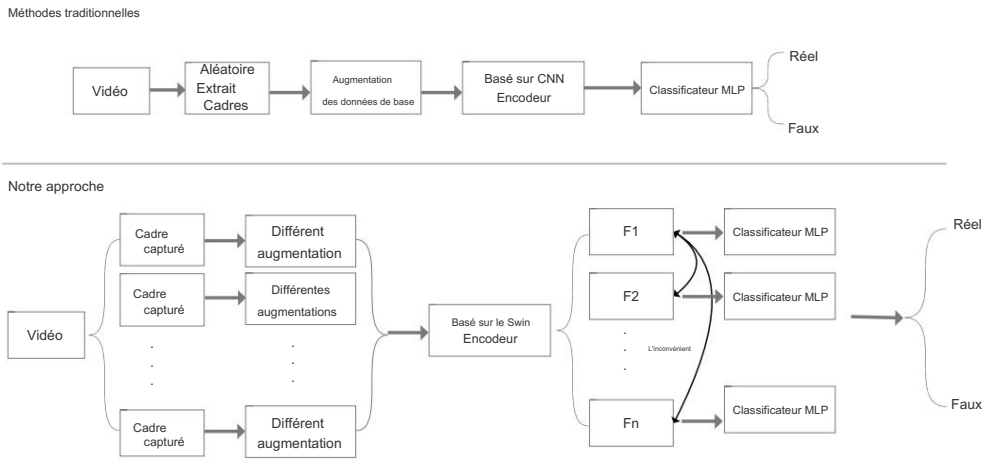


Figure 1. Illustration du framework Swin-Fake comparé au framework traditionnel de détection de vidéo deepfake.

Il y a trois améliorations principales dans notre méthode par rapport aux détecteurs de deepfake traditionnels : (1) Nous utilisons cinq méthodes d'augmentation des données, dont la transformation de base, l'effacement aléatoire [12], l'augmentation aléatoire, le recadrage aléatoire et le DFDC Selim [13], qui sont appliquées de manière aléatoire. , et ils éviteront largement le surajustement au stade de l'entrée. (2) Swin Transformer est choisi comme encodeur, qui combinera les corrélations entre différents patchs d'image divisés. (3) La perte totale finale est déterminée par deux composantes, à savoir la perte de cohérence et la perte d'entropie croisée, et la décision est garantie par l'apprentissage de la cohérence.

2. Travaux connexes

2.1. Détection des

Deepfakes La détection des Deepfakes est toujours définie comme un travail de classification binaire ou multiclasse car elle nécessite essentiellement que le modèle distingue les médias comme étant réels ou faux. Le framework le plus populaire consiste à utiliser Vanilla Xception [14] ou ResNet [15] comme épine dorsale.

Machine Translated by Google

pour encoder puis combiner des apprentissages contrastifs ou explorer la cohérence des représentations. Capsule Network [4] est un réseau léger et efficace qui peut résoudre les problèmes de « graphique inverse » et propose un algorithme de routage dynamique pour regrouper les fonctionnalités extraites.
CORE [16] est une méthode d'apprentissage de cohérence basée sur Xception Network qui améliore le nombre d'augmentations de données pour prouver la cohérence du modèle. Youtu-Lab [17] a proposé une architecture d'apprentissage à double contraste pour distinguer l'authenticité des visages en utilisant également différentes augmentations de données. Les détecteurs de deepfake à apprentissage d'ensemble pourraient également améliorer considérablement les performances de classification et ont été largement appliqués dans les recherches récentes ; par exemple, Zhang [18] a proposé une méthode d'apprentissage d'ensemble de caractéristiques hétérogènes pour extraire d'abord les caractéristiques de dégradé de gris, les caractéristiques du spectre et les caractéristiques de texture des images, puis les intégrer dans un vecteur de caractéristiques d'ensemble via un processus d'aplatissement. En utilisant DeepfakeStack, les auteurs de [19] ont choisi de combiner plusieurs modèles de classification de deepfake de pointe pour créer un classificateur composite amélioré qui pourrait atteindre une précision de 99,65 % dans certains ensembles de données de deepfake. Cependant, la méthode proposée, Swin-Fake, vise à explorer la capacité de Swin Transformer à extraire des caractéristiques falsifiées, telles que le bruit PRNU et l'inadéquation des limites, puis à extraire différentes images d'une vidéo pour prouver la cohérence du modèle dans le processus de classification en utilisant différentes images. augmentations de données.

2.2. Swin Transformer

Swin Transformer [11] est un transformateur de vision hiérarchique qui améliore les blocs d'attention multi-têtes (MSA) en attention multi-têtes de fenêtre (W-MSA) et en blocs d'attention multi-têtes de fenêtre décalée (SW-MSA). Il superpose différentes tailles de fonctionnalités en configurant différentes tailles de fenêtres, ce qui est différent du Vision Transformer traditionnel [7], et pourrait permettre d'économiser davantage sur les coûts de calcul que le Vision Transformer traditionnel. Normalement, l'image d'entrée a une taille de 3 × 3 × 224 et la taille des caractéristiques de sortie est de 7 × 7 × 768. Ce cadre contient une couche de portions de correctifs, une couche d'intégration linéaire et douze blocs Swin Transformer pour extraire les caractéristiques, et les caractéristiques sont corrélé avec différentes intégrations de correctifs. Cette structure de réseau peut simuler plus efficacement le sentiment de cohérence et d'incohérence de différents patchs lorsque les yeux humains observent et scannent différentes zones faciales deepfake. De plus, nous avons étudié les articles existants liés aux détecteurs de deepfake basés sur Transformer et avons découvert, de manière surprenante, qu'il n'y avait pas beaucoup d'articles axés sur l'apprentissage de la cohérence spatiale avec un squelette Transformer. La plupart d'entre eux consacrent davantage d'efforts à la conception de blocs d'extraction de caractéristiques temporelles afin d'obtenir davantage d'informations de cohérence temporelle. Récemment, Ilyas et al. [20] ont proposé un AVNet pour détecter les médias audiovisuels à l'aide de Swin Transformer, et Khalid [21] a proposé d'utiliser Swin Y-Net pour la détection des deepfakes.

2.3. Augmentation des

données Dans le domaine de la vision par ordinateur, il est important d'appliquer l'augmentation des données, qui constitue la première étape pour prévenir le surajustement et une méthode efficace pour augmenter la quantité de données. Dans cet article, nous utilisons uniquement cinq méthodes de manipulation d'images pour modifier les valeurs et les positions des pixels. La transformation de base est utilisée pour combiner la normalisation et le redimensionnement des pixels. L'effacement aléatoire [12] est une transformation de données découpées qui sélectionne de manière aléatoire un bloc rectangulaire de la zone du visage et change sa couleur en totalement noir. Le recadrage aléatoire est utilisé pour recadrer la zone du visage dans un rapport aléatoire, puis la redimensionner à une hauteur et une largeur spécifiques. DFDC Selim est une augmentation de données complexe contenant du bruit gaussien, du flou gaussien, du décalage et de l'échelle aléatoires, et s'est déjà avérée être l'augmentation de données la plus utile dans le travail de classification des deepfakes [16]. L'augmentation aléatoire sélectionne au hasard soit l'effacement aléatoire, le retournement horizontal aléatoire ou le recadrage de redimensionnement aléatoire. Par rapport à la conception des détecteurs deepfake traditionnels, nous avons considérablement amélioré la diversité et le caractère aléatoire des données d'entrée, et ils peuvent être utilisés pour la vérification ultérieure de la similarité entre les différentes images vidéo d'un clip vidéo.

Machine Translated by Google

3. Méthodes proposées

Dans ce travail, nous décrivons le pipeline de détection d'images deepfake et le divisons en quatre parties : prétraitement des données (y compris la détection faciale, le recadrage et l'augmentation des données), l'extraction de caractéristiques, le calcul de cohérence et la prédiction via des classificateurs. Comme le montre la figure 2, nous capturons d'abord également les images d'une vidéo détectée, puis sélectionnons et appliquons des augmentations de données de manière aléatoire pour créer différentes vues de données. Après avoir extrait les caractéristiques via Swin Transformer, nous calculons séparément les distances cosinusoïdales entre les représentations en combinaisons et soustrayons la distance cosinusoïdale moyenne en tant que perte de cohérence (voir l'al Pour éviter le problème des classes déséquilibrées, nous combinons de vraies vidéos d'autres bases de données dans notre ensemble de formation, ce qui est très important pour une évaluation plus approfondie ; De plus, nous choisissons également de sur-échantillonner les images vidéo réelles ; par exemple, si chaque fausse vidéo est divisée également en huit images, la vraie image vidéo est divisée également en 16 ou 32 en conséquence.
Cela pourrait largement empêcher la sortie prévue du modèle entraîné de rester dans la même classe.

Algorithme 1 Le flux de travail de Swin-Fake Input : Le Swin

Transformer pré-entraîné : f(x); séquences vidéo : X Divisez également chaque vidéo en M images.

Recadrez le visage et agrandissez la largeur et la hauteur pour obtenir des images du visage.

Sélectionnez au hasard les méthodes d'augmentation des données pour éviter le surajustement.
pour i = 1 à M, utilisez

les séquences d'entrée X pour regrouper l'ensemble.

Calculez le score d'attention entre différentes intégrations de correctifs divisés.

Calculez f(x) via la propagation vers l'avant pour obtenir les fonctionnalités 2D Fx. 2 Calculez la distance cosinusoïdale

LCos entre les paires C à l'aide de l'équation (3).

$$LCons = \sum_{1}^{M} \frac{1}{M} \text{ moyenne (LCos)}$$

une couche linéaire pour projeter Fx sur 2 classes.

$$LCE = -\sum_{1}^{N} Ltot\,[y \log(p) + (1 - y)\log(1 - p)]$$

$$= \alpha LCons + (1 - \alpha)LCE$$ Effectuer une

propagation vers l'arrière et enregistrer les gradients pour chaque couche. fin pour la sortie : un modèle Swin-Fake

entraîné f(x).

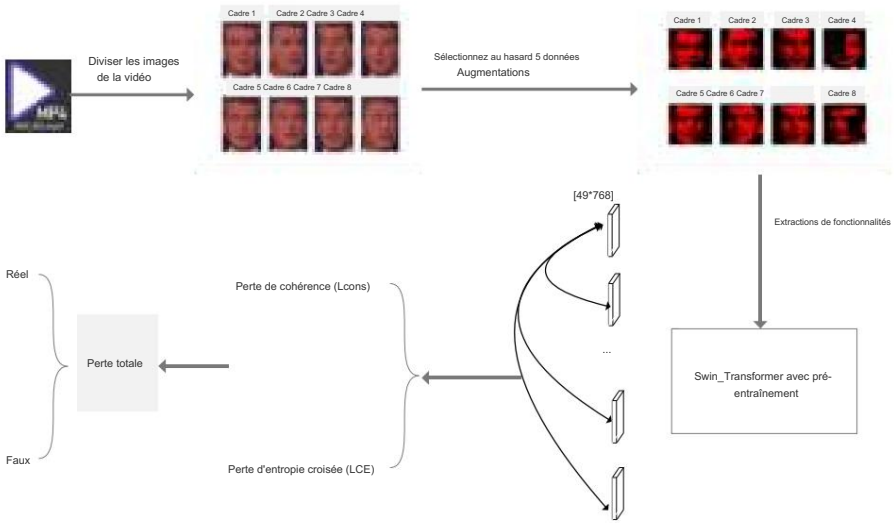


Figure 2. Explication de l'architecture Swin-Fake. Nous divisons d'abord M images d'une vidéo et appliquons différentes augmentations de données pour chaque image. Ensuite, ils sont envoyés vers un encodeur Swin Transformer partagé. Après avoir obtenu les représentations M , elles seront envoyées pour calculer séparément la perte de classification et la perte de cohérence.

Machine Translated by Google

3.1. Travail de pré-traitement

Tout d'abord, nous donnons un lot d'entrée de vidéos B et divisons également chaque vidéo en M images vidéo en fonction du calcul du nombre total d'images de chaque vidéo. L'étape de prétraitement intègre également un détecteur facial, « SCRFD » [22] pour localiser les zones du visage, aligner les visages et les recadrer pour créer des ensembles de données spécifiques. Plus précisément, ce détecteur facial est basé sur Insightface et utilise des méthodes spécifiques de redistribution d'échantillons (SR) et de redistribution informatique (CR) pour la détection faciale. « scrfd 10g kps.onnx » est l'un des fichiers de poids de modèle utilisant cette méthode de détection de visage [22], et kps représente les 5 points clés du visage détectés dans ce modèle. Pour préserver certaines informations d'arrière-plan, nous agrandissons la largeur et la hauteur des images recadrées de 10 %. Ensuite, le total des trames M × B sont soigneusement organisées dans l'ordre, servant d' entrées pour le transformateur Swin, et toutes redimensionnées à 3 × 224 × 224. Puisque nous appliquons et sélectionnons au hasard cinq augmentations de données dans un ensemble de transformation T sur M × Images B , les ensembles de vecteurs d'entrée I ont une taille de [B, M, 3, 224, 224], ce qui signifie que chaque groupe contient M [3, 224, 224] vues. Enfin, l'ensemble de vues d'entrée s'écrit comme suit :

$$Je = \{\{x1, x2. . . xM\}1 . . . \{x1, x2. . . xM\}B \} \text{ où} \quad (1)$$

xn représente chaque vue d'image, B représente un lot de vidéo, {x1, x2. . . xM}B représente le B-ème groupe de vues de données et M représente le nombre de trames divisées de manière égale.

Une fois les vues de données d'entrée obtenues, cinq méthodes d'augmentation des données seront appliquées de manière aléatoire sur ces vues de données. Ces tenseurs augmentés constituent l'entrée finale des entrées du modèle Swin-Fake, comme le montre la figure 3.



Figure 3. Exemples de données augmentées aléatoires. Pour l'effacement aléatoire, nous définissons l'effacement aléatoire qui sera effectué sur 0,8, l'échelle est de 0,02 à 0,2 et le rapport de zone effacée est de 0,5 à 2,0. Pour Random Crop, nous définissons l'échelle Random Crop de 0,77 à 1 et le rapport Random Crop de 0,9 à 1,1.

3.2. Réseau d'encodeurs

Nous adoptons Swin Transformer [11] comme extracteur de fonctionnalités f en raison de sa structure hiérarchique unique. Il contient plusieurs blocs Transformer empilés, parmi lesquels les blocs de niveau inférieur peuvent capturer certaines informations de couleur et de bord et les blocs de niveau supérieur peuvent être utilisés pour analyser les informations sémantiques. Après avoir appliqué l'approche de partitionnement de fenêtre décalée et l'intégration linéaire, nous pouvons modifier la dimension de l' entité d'entrée et obtenir les vecteurs de requête (Q), de clé (K) et de valeur (V) séparément. Les requêtes (Q) et les clés (K) ont la même dimension de d. En calculant les produits scalaires de la requête (Q) avec toutes les clés (K) et en divisant chacun par $\sqrt{d}$, la première étape de la corrélation d'attention est terminée. Ensuite, nous ajoutons le biais et appliquons une fonction softmax pour compresser la sortie dans la plage de 0 à 1 et obtenir un score de valeur. Cette méthode de calcul de l'attention vise à calculer la somme pondérée des valeurs, ce qui est la même que « Scaled Dot-product Attention ».
Le calcul de l'attention personnelle s'écrit

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{So f tMax}(QKT/\sqrt{d} + B)V \text{ où } 1/\sqrt{d} \text{ est} \quad (2)$$

le facteur d'échelle de Q, K et B est le biais de Q, K, V.

Lorsque l'ensemble d'entrée I passe par l'encodeur et est mappé en représentations B × M , la représentation f(xn) est un vecteur à deux dimensions d avec une taille de [49, 768].

Machine Translated by Google

Pendant ce temps, chaque représentation M est définie comme un groupe et intégrée au calcul de la perte de cohérence. Après avoir appliqué une couche linéaire sur le dernier bloc Swin de base, nous envoyons les représentations pour calculer la perte d'entropie croisée pour la classification. Ainsi, chaque lot de trames nécessite de passer par plusieurs opérations augmentées de données, puis nous pouvons obtenir les caractéristiques de basse dimension extraites (voir Figure 4). Enfin, deux vecteurs de sortie seront calculés, un pour le calcul de la perte de cohérence et un autre exploité par la couche linéaire pour la perte de classification. Une explication détaillée de ces deux calculs de fonction de perte peut être vu à la section 3.3.

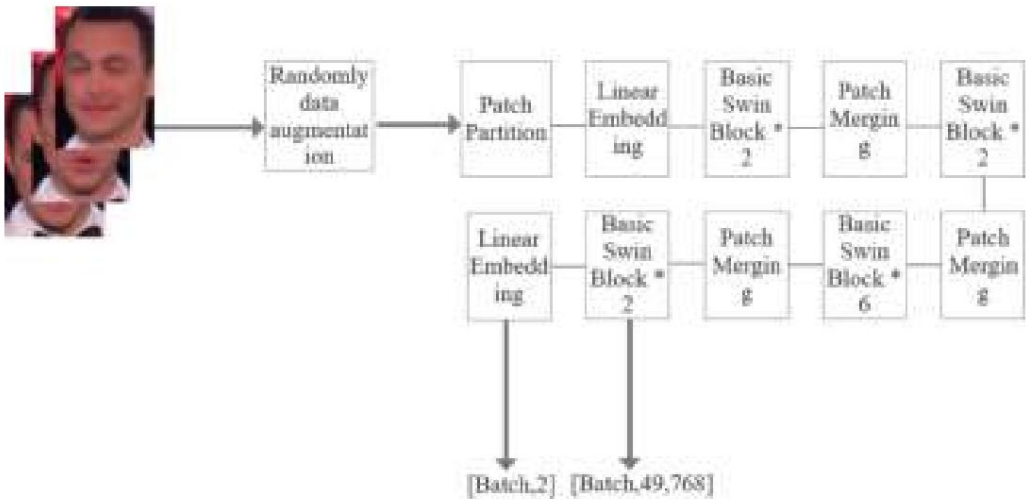


Figure 4. L'architecture du backbone Swin Transformer. représente le nombre de blocs Swin de base appliqués dans le backbone. Il existe deux vecteurs de sortie pour chaque ensemble de vues de données d'entrée dans notre modèle, qui sont les caractéristiques de faible dimension extraites d'une taille de [M × 49 × 768] et la probabilité prédite [M × 2].

3.3. Fonctions de perte

La fonction de perte de ce modèle est conçue avec deux composantes : la perte de classification et la perte de cohérence. Une perte de cohérence est appliquée sur chaque groupe de M représentations extraites et nous soustrayons leurs distances. De plus, la raison pour laquelle nous adoptons la distance cosinusoïdale pour compléter la conception de perte de cohérence est que nous ne forçons pas chaque paire de représentations à être exactement la même mais à être de plus en plus similaires. Le calcul de la distance cosinus de chaque paire de représentations peut s'écrire

$$\text{LCos} = (1 - \text{fxi} \cdot \text{fxt}) \tag{3}$$

où xi et xt représentent les i-ième et t-ième images de vues de données, et f (xi) et f (xt) représentent les représentations normalisées extraites par un encodeur partagé.

Puisque nous avons obtenu des clips vidéo augmentés avec la quantité de groupes B comme entrée de notre modèle, nous devons également calculer la similarité entre ces caractéristiques des clips vidéo capturés. Le but est de résoudre certains résultats incorrectement distingués d' échantillons durs en raccourcissant leurs distances cosinusoïdales, et nous considérons cela comme une perte de cohérence. Quant à un autre facteur qui influence la perte totale, la perte de cohérence est conçue pour calculer les distances cosinusoïdales moyennes des vidéos du lot B. Plus précisément, les M représentations extraites d'une vidéo peuvent générer C paires de similitudes grâce à l'équation ci-dessus. Le seul $C = \frac{2}{M}$. la cohérence d'une vidéo peut être exprimée comme la moyenne de similarité de la paire $\frac{2}{M}$, et la perte totale de cohérence des vidéos du lot B nous oblige à calculer la valeur moyenne de toutes les cohérences uniques calculées. Par conséquent, la perte de cohérence peut s'écrire

$$\text{LCons} = \frac{1}{B}\sum_{1}^{B} \text{moyenne}(\text{LCos}) = \frac{1}{B}\sum_{1}^{B} \text{moyenne}(1 - \text{fxi} \cdot \text{fxt}) \tag{4}$$

Machine Translated by Google

où B représente la taille du lot de la vidéo.

L'objectif principal de la configuration de la perte de cohérence est de prouver que, quel que soit le réalisme d'une image vidéo deepfake particulière, le modèle est capable de raccourcir sa distance spatiale avec d'autres images contrefaites. D'autre part, la perte de cohérence valide la cohérence de la classification des différentes images d'une même vidéo. Le travail de classification étant indissociable des étiquettes supervisées, nous appliquons la perte d'entropie croisée standard comme perte de classification, et nous la formulons comme suit :

$$LCE = -\sum_{1}^{M \times B} [y \log(p) + (1 - y)\log(1 - p)] \quad (5)$$

où y est l'étiquette de vérité terrain, p est la probabilité prédite et M × B représente le nombre total d'images vidéo.

Notre modèle étant un modèle d'apprentissage de cohérence, nous utilisons deux fonctions de perte (perte de cohérence et perte d'entropie croisée) dans la combinaison linéaire pour former notre perte totale. Cependant, nous définissons l'hyper-paramètre α comme balance de poids pour observer quelle proportion de ces deux fonctions de perte peut atteindre la perte totale minimale et atteindre la précision la plus élevée. Dans la section 4.4, nous effectuons un test d'ablation pour observer quelle valeur de cet hyper-paramètre peut prédire le plus grand nombre d'échantillons en parcourant le paramètre de poids en ajoutant 0,1 dans chaque expérience, car nous espérons trouver le poids le mieux adapté pour équilibrer ces deux pertes. fonctions, et nous n'espérons pas que la perte totale soit largement biaisée en faveur de l'un des résultats des fonctions de perte.

$$Ltot = \alpha LCons + (1 - \alpha)LCE \quad (6)$$

où α est l'hyper-paramètre permettant d'équilibrer la perte d'entropie croisée et la perte de cohérence, et il va de 0 à 1.

4. Expériences 4.1. Ensembles de données

Pour évaluer notre méthode, nous avons sélectionné quatre ensembles de données courants dans ce domaine : FaceForensics ++ [23], DFDC [24], Celeb-DF [25] et FaceShifter [26]. En particulier, les deux premiers ensembles de données ont été utilisés pour la phase de formation, et Celeb-DF V2 et FaceShifter ont été utilisés pour des expériences multi-ensembles de données afin de prouver la capacité de généralisation de notre modèle. FaceForensics++ est un ensemble de données pionnier à grande échelle en matière de manipulation faciale qui contient 1 000 vidéos réelles et 4 000 fausses vidéos générées par Face2Face, FaceSwap, Neural Textures et Deepfakes. DFDC est le plus grand ensemble de données de ces quatre ensembles de données, contenant 119 197 vidéos filmées par de vrais acteurs. Par rapport aux deux ensembles de données précédents, Celeb-DF est dérivé de 590 vidéos YouTube originales et de 5 639 vidéos manipulées avec un mélange de couleurs avancé, difficile à distinguer à l'œil humain. FaceShifter est une sous-classe des ensembles de données FaceForensics++ et contient 1 000 fausses vidéos avec différents scénarios de prise de vue. Compte tenu des données d'entraînement déséquilibrées de FaceForensics++, nous avons combiné de manière aléatoire 2000 vidéos réelles de la base de données DFDC avec de vraies vidéos FF++ pour résoudre ce problème. Quant à la formation DFDC, nous avons choisi de sous-échantillonner certaines fausses images vidéo pour résoudre le déséquilibre des données.

4.2. Détails de mise en œuvre

Pour le prétraitement des données, nous avons extrait M images de chaque vidéo en définissant un seuil de confiance de 0,5 et un seuil NMS de 0,5 pour « scrfd 10g kps.onnx ». De plus, les visages recadrés détectés avec des cadres de délimitation ont été agrandis de 1,2 en largeur et en hauteur pour garantir l'existence d'informations de base sur les entrées du modèle. En ce qui concerne les paramètres d'augmentation des données, nous avons défini une probabilité de 80 % d'effacer la zone du visage, la plage de proportion de la zone effacée par rapport à l'image d'entrée a été définie entre 0,02 et 0,2, et la plage du rapport hauteur/largeur de la zone effacée. a été réglé entre 0,5 et 2,0 lors de l' opération d'effacement aléatoire. Dans l'augmentation Random Crop, nous avons fixé les limites inférieure et supérieure de l'échelle à 0,77 et 1, ce qui signifie que la zone aléatoire de recadrage avant le redimensionnement était de 0,77 à 1 en conséquence. Au cours de l'expérience, certaines images sélectionnées (voir figure 5) avec

Machine Translated by Google

aucun visage humain n'a été copié à partir de la dernière trame d'index détectée au lieu d'être directement envoyé à l'ensemble de vues de données d'entrée.



Figure 5. Quelques échantillons de deepfake traités par « scrfd 10g kps.onnx », qui est l'entrée originale de notre formation de modèle.

Pour la formation du modèle, nous avons défini la taille du mini-lot vidéo sur 4 avec une taille d'image de 224 × 224, puis avons utilisé un optimiseur AdamW [27] avec une décroissance du poids définie sur 0,05 et le taux d'apprentissage défini sur 0,0001. Pour entraîner efficacement ce modèle, nous avons arrêté l'entraînement tôt s'il n'y avait pas d'augmentation de la précision de validation au cours des 5 premières époques, et l'époque totale a été fixée à 30. De plus, tous les taux d'abandon ont été fixés à 0,2 pour éviter un surajustement dans notre expérience. Tous nos modèles utilisaient swin-tiny-patch4-window7-224.pth et étaient pré-entraînés sur ImageNet-1K comme épine dorsale, et les caractéristiques de sortie ont été extraites par la couche linéaire d'une taille de [M, 49, 768] et les vecteurs de taille [M, 2]. Nous avons initialement adopté une pondération équilibrée de 0,5 car nous considérions au départ la perte de cohérence comme ayant la même importance que la perte de classification.

4.3. Étude dans l'ensemble

de données Dans cette section, nous évaluons les performances de validation de notre modèle proposé dans les mêmes sources que les ensembles de données d'entraînement. Pour les expériences intégrées aux ensembles de données, nous avons évalué DFDC et FaceForensics++, qui sont deux ensembles de données relativement volumineux, car nous avons constaté que Swin Transformer nécessite toujours une grande quantité de données d'entraînement pour atteindre un bon niveau de validation lors des expériences d'entraînement ; sinon, il présentera une précision de validation de départ relativement faible dans certains ensembles de données de formation à petite échelle. Et l'hyper-paramètre initial a été défini sur 0,5 par défaut. Nous avons comparé notre méthode d'apprentissage de cohérence avec trois lignes de base : Capsule Network, STIL [28] et ISTVT [10]. Comme le montre le tableau 1, Capsule Network présente la précision la plus faible et ISTVT fonctionne mieux que STIL. Notre approche fonctionne bien mieux que Capsule Network et la précision de l'ensemble de données est un peu supérieure à celle de STIL et ISTVT.

Machine Translated by Google

Tableau 1. Précision de la détection des Deepfakes. Les meilleurs résultats de précision dans les ensembles de données sont en gras. À l'exception de Capsule Network, qui est reproduit, les résultats des autres méthodes sont issus de [10,28].

Méthodes	FF++				DFDC
	DF	F2F	FS	NT	
Filet à capsules	98,5%	96,7%	94,5%	91,8%	-
STIL	99,6%	99,3%	97,1%	95,4%	89,8%
ISVT	99,6%	99,6%	100%	96,8%	92,1%
Notre approche	99,9%	99,6%	100%	98,8%	93,7%

DF : Deepfakes ; F2F : Face2Face ; NT : textures neuronales ; FS : FaceShifter.

4.4. Résultats des tests d'ablation

Pour tester la signification de la branche cohérence de notre modèle, nous avons également mené une expérience d'ablation (voir tableau 2) sur la classification d'images deepfake de Swin Transformer avec notre approche (avec apprentissage cohérent supervisé). Nous avons constaté que l'apprentissage cohérent peut effectivement augmenter la précision, car notre approche utilise la perte de cohérence pour raccourcir les distances (augmente la similarité) entre les différentes images de la vidéo afin que si une trame est distinguée par la branche de classification comme fausse avec un score très élevé score de confiance, il existe une forte probabilité que d'autres bases d'échantillonnage rigoureuses soient prises en compte aussi faux.

Tableau 2. Comparaison de la précision des expériences d'ablation. Nous avons utilisé Swin Transformer pour effectuer une testez deepfake image binaire et comparez sa précision avec celle de notre approche.

Méthodes	FF++ (Test binaire)	DFDC
Transformateur Swin	89,4%	91,4%
Notre approche	94,3%	93,7%

De plus, le poids d'équilibrage α est une autre variable qui détermine la perte totale finale ; ainsi, nous avons mené une expérience d'ablation pour déterminer la quantité de poids nécessaire pour que la perte de cohérence montre les meilleures performances dans ce modèle discriminant en définir cet hyper-paramètre à 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 et 0,8. Dans ce test d'ablation, nous avons toujours utilisé FaceForensics++ comme ensemble de données pour explorer quel poids d'équilibre pourrait atteindre le plus haut précision prévue. De plus, nous avons combiné toutes les fausses catégories en une seule classe pour tester performances binaires au lieu de tester plusieurs classifications. Parce que nous n'avons pas défini cela équilibre du poids comme paramètre apprenable dans notre modèle, nous avons choisi de parcourir le poids équilibre en ajoutant 0,1 par expérience. Une fois que nous avons obtenu la plus grande précision, nous avons considéré ce modèle comme modèle de pointe, et nous avons utilisé les paramètres entraînés de ce modèle pour mener des expériences sur des ensembles de données croisées. Comme le montre le tableau 3, nous constatons que le poids le réglage de la balance de 0,7 montre les meilleures performances et a été formé sur FaceForensics++ test binaire.

Tableau 3. Précision de l'expérience d'ablation sur différentes balances de poids. Ceci est pour tester quel poids l'équilibre de notre fonction de perte permettra d'obtenir le meilleur résultat.

α	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Précision	92,6%	93,9%	94,1%	94,3%	93,7%

4.5. Étude multi-ensembles de données

En raison des multiples méthodes de falsification, il est important d'évaluer les performances du modèle sur plusieurs ensembles de données. Pour tester la capacité de généralisation de notre modèle, nous avons formé notre modèle sur FaceForensics++ et je l'ai testé sur Celeb-DF, FaceShifter et DFDC. Étant donné que La taille des échantillons de la plupart des ensembles de données deepfake pour la vraie classe et la fausse classe est déséquilibrée, nous

Machine Translated by Google

a également choisi d'utiliser l'aire sous la courbe (AUC) pour évaluer la robustesse de notre modèle, comme le montre le tableau 4.

Tableau 4. L'AUC de l'expérience multi-ensembles de données. Nous avons formé notre modèle sur FF++ et testé les données invisibles. Les meilleurs résultats d'AUC d'ensembles de données croisés sont en gras. Les résultats des autres méthodes sont de [10,28–31].

Des modèles	Célébrité-DF	FaceShifter	DFDC	Moyenne
Filet à capsules	34,5%	42,4%	-	38,5%
STIL	75,6%	-	-	75,6%
ISVT	84,1%	99,3%	74,2%	85,9%
Radiographie du visage	79,5%	92,8%	65,6%	79,3%
FTCN	86,9%	98,8%	74,0%	86,6%
LipForensics	82,4%	97,1%	73,5%	84,3%
Notre approche	88,8%	98,3%	71,8%	86,3%

Nous avons constaté que notre approche ne pouvait donner que les meilleurs résultats sur Celeb-DF. Ce c'est parce que Celeb-DF contient un travail de post-traitement avancé tel que le mélange des couleurs et il est vraiment difficile de savoir quand une inadéquation des limites se produit dans les médias générés. Pour prouver ce point de vue, nous avons choisi de créer des cartes thermiques de notre modèle et d'autres modèles de détection basés sur CNN pour expliquer la visualisation par le modèle des régions focales des deepfakes. médias. En observant la carte thermique de notre modèle, nous avons constaté que notre modèle se concentre davantage sur le contenu du visage humain généré tel que les lèvres et les yeux au lieu de la texture des limites informations (voir Figure 6). En vérifiant quelques exemples de vidéos de FaceShifter, nous avons constaté que les indices de contrefaçon se produisent toujours dans la zone limite du visage, qui est la région du visage qui notre modèle y prête moins attention, mais les indices de contrefaçon de Celeb-DF apparaissent sur les traits du visage, comme des yeux et des lèvres humains anormalement manipulés. De plus, nous avons comparé les données dans Celeb-DF avec les données de DFDC, et nous avons constaté que DFDC contient plus de données avec différents scénarios de prise de vue, tels que des arrière-plans intérieurs sombres et des visages extrêmes pose. Cela rend très difficile pour notre modèle d'atteindre la cohérence et d'obtenir des informations utiles. informations pour distinguer les médias réels des faux, car nous avons utilisé le modèle formé par FaceForensics++, et comprenait davantage de visages humains avec des poses normales et des prises de vue lumineuses. scénarios, qui est similaire à la distribution de données Celeb-DF.

De plus, nous avons également comparé la méthode ISTVT basée sur les transformateurs comme référence. modèle, et il a obtenu des résultats d'AUC légèrement meilleurs sur FaceShifter et DFDC (voir Figure 7). En effet, les auteurs qui ont utilisé l'ISTVT ont appliqué un mécanisme d'auto-soustraction et une attention personnelle temporelle dans leur travail, ce qui manque à notre approche. L'auto-soustraction Le mécanisme peut se concentrer davantage sur la distorsion inter-images, qui est une autre technique importante pour la détection des deepfakes. Il nécessite l'application d'un jeton d'entrée avant la projection pour interroger et vecteurs clés. Il génère des résidus de fonctionnalités pour remplacer les fonctionnalités d'origine. Cependant, notre modèle obtient toujours des résultats compétitifs par rapport aux autres modèles précédents. modèles de pointe tels que STIL et Face X-ray.

Machine Translated by Google



Figure 6. Carte thermique de comparaison entre d'autres méthodes de détection de deepfake et notre approche. À partir de cette figure, il est évident que la plupart des détecteurs de deepfake se concentrent sur les informations limites des faux médias générés.

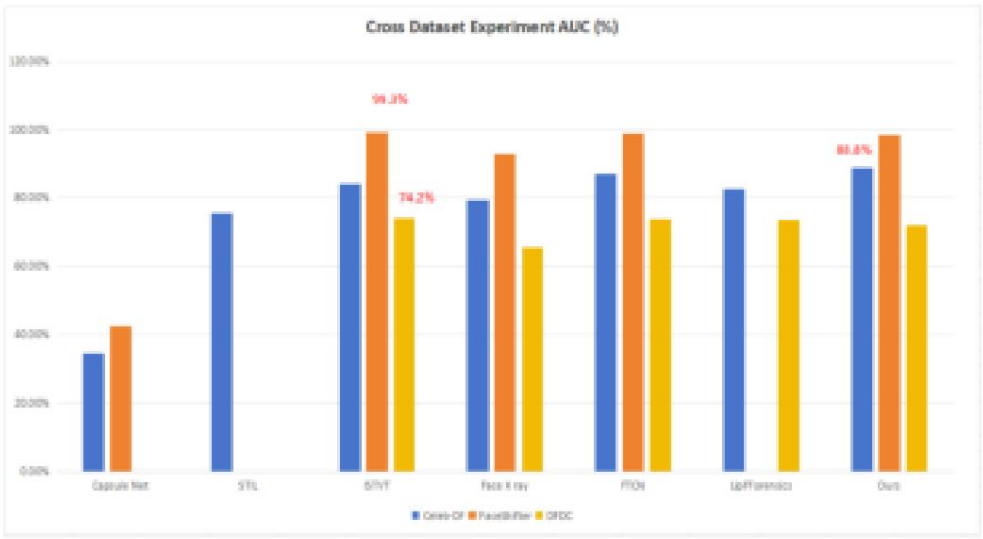


Figure 7. Résultats de l'AUC d'ensembles de données croisés basés sur Capsule Net, STIL, ISTVT, Face X-ray, FTCN, LipForensics et notre approche. Les meilleures performances sur chaque ensemble de données sont indiquées dans la figure.

5. Conclusions et travaux futurs

Dans cet article, nous proposons Swin-Fake, qui, pour la première fois, combine Swin Transformer avec la perte de cohérence, comme méthode d'apprentissage de cohérence pour la détection des deepfakes. Nous utilisons Swin Transformer comme extracteur de caractéristiques et utilisons la distance moyenne du cosinus comme mesure de la perte de cohérence, ce qui a amélioré la capacité de généralisation dans certaines bases de données deepfake. Nous avons prouvé qu'un classificateur basé sur Transformer pouvait atteindre un niveau plus élevé dans le domaine de la détection des deepfakes par rapport aux autres méthodes précédentes basées sur CNN. Au cours des phases de formation et de validation, nous avons conclu que Swin Transformer avait une meilleure capacité de distinction des deepfakes, tandis que les bases de données à grande échelle telles que FF+ + et DFDC ne présentent pas de performances prometteuses sur certains petits ensembles de données tels que Celeb DF. De plus, le calcul de la cohérence entre les caractéristiques des trames pourrait réduire considérablement la perte et améliorer les mesures d'évaluation ; ainsi, nous pensons que l'application de la méthode d'apprentissage de cohérence avec Transformer pour la détection des deepfakes pourrait constituer une nouvelle tendance dans la détection des faux médias.

La détection des vidéos Deepfake ne peut pas être complétée sans informations temporelles, car l'instabilité des images se produit toujours dans les images adjacentes. Dans les recherches récentes, l'attention temporelle est toujours combinée à l'attention spatiale pour la détection vidéo. En tant qu'autre technique dans le domaine de la détection vidéo, l'attention temporelle peut être considérée comme un mécanisme de sélection temporelle dynamique qui détermine quand prêter attention à une certaine caractéristique d'une vidéo, et est souvent appliquée dans le traitement vidéo. C'est aussi une méthode efficace pour augmenter l'évaluation

Machine Translated by Google

métriques dans ce domaine si nous pouvons combiner les informations de cohérence temporelle avec les informations spatiales extraites, et la méthode la plus courante consiste à concevoir des modules spécifiques pour explorer la cohérence ou l'incohérence temporelle en appliquant des couches convolutives horizontales et verticales. Ainsi, dans de futurs travaux, nous étudierons plus en détail l'auto-attention temporelle du squelette basé sur Swin Transformer. Même si nos travaux actuels se concentrent sur les détecteurs vidéo, nous nous concentrons toujours sur l'extraction de caractéristiques spatiales et la cohérence des caractéristiques est appliquée pour la comparaison intra-classe. Combiner cohérence temporelle et cohérence spatiale impliquerait probablement plus d'informations, ce qui bénéficierait à la classification des vidéos. Quant à la balance de poids α, nous avons ajouté 0,1 dans chaque expérience pour tester l'efficacité du bloc de cohérence et obtenir la valeur avec la plus grande précision Pour obtenir une valeur plus précise de cet hyper-paramètre, nous définirons l'équilibre du poids comme paramètre apprenable dans les enquêtes futures. De plus, nous étudierons plus en détail d'autres méthodes de visualisation pour les détecteurs de deepfake basés sur Swin Transformer afin d'interpréter les caractéristiques spatiales capturées et de contribuer au classificateur de deepfake.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, LYG et XJL ; méthodologie, LYG et XJL ; logiciel, LYG; validation, LYG; analyse formelle, LYG ; enquête, LYG; ressources, LYG et XJL ; conservation de données, LYG et XJL ; rédaction : préparation du projet original, LYG, XJL et PHJC ; rédaction – révision et édition, LYG, XJL et PHJC ; visualisation, LYG et XJL ; supervision, XJL et PHJC ; administration du projet, XJL et PHJC Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les ensembles de données relatifs sont téléchargés à partir de [24], les codes reproduits par DFDC proviennent de [13].

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Goodfellow, moi; Pouget-Abadie, J. ; Mirza, M. ; Xu, B. ; Wared-Farley, D. ; Ozaïr, S. ; Courville, A. ; Bengio, Y. Réseau contradictoire génératif . Commun. Acm 2018, 63, 139-144. [Référence croisée]
2. Karras, T. ; Lainé, S. ; Aila, T. Une architecture génératrice basée sur le style pour les réseaux adverses génératifs. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Long Beach, Californie, États-Unis, 15-20 juin 2019.
3. Ho, J. ; Jain, A. ; Abbeel, P. Modèles probabilistes de diffusion de débruitage. Dans Actes de la 34e Conférence internationale sur Neural Information Processing System, Red Hook, NY, États-Unis, 6-12 décembre 2020 ; pages 6840 à 6851.
4. Nguyen, HH ; Yamagishi, J. ; Echizen, I. Utilisation d'un réseau de capsules pour détecter les fausses images et vidéos. Dans Actes de Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, Californie, États-Unis, 16-20 juin 2019.
5. Das, S. ; Seferbekov, S. ; Datta, A. ; Islam, MS ; Amin, MR Vers la résolution du problème des deepfakes : une analyse sur l'amélioration de la détection des deepfakes à l'aide de l'augmentation dynamique du visage. Dans Actes de la conférence internationale IEEE/CVF sur la vision par ordinateur, Montréal, Colombie-Britannique, Canada, 11-17 octobre 2021.
6. Zhao, T. ; Xu, X. ; Xu, M. ; Ding, H. ; Xiong, Y. ; Xia, W. Apprendre l'auto-cohérence pour la détection des Deepfakes. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Nashville, Tennessee, États-Unis, 20-25 juin 2021.
7. Dosovitskiy, A. ; Beyer, L. ; Kolesnikov, A. ; Weissenborn, D. ; Zhai, X. ; Unterthiner, T. ; Dehghani, M. ; Minderer, M. ; Heigold, G. ; Gelly, S. ; et coll. Une image vaut 16 × 16 mots : transformateurs pour la reconnaissance d'images à grande échelle. Dans Actes de la Conférence internationale sur les représentations d'apprentissage, virtuel, 26 avril-1er mai 2020.
8. Khan, SA ; Dai, H. Transformateur vidéo pour la détection des Deepfakes avec apprentissage incrémentiel. Dans les actes de la 29e ACM Conférence internationale sur le multimédia, événement virtuel, 20-24 octobre 2021 ; pages 1821 à 1828.
9. Khormali, A. ; Yuan, J. DFDT : Un cadre de détection DeepFake de bout en bout utilisant Vision Transformer. Appl. Sci. 2022, 12, 2953. [Référence croisée]
10. Zhao, C. ; Wang, C. ; Câlin.; Chen, H. ; Liu, C. ; Tang, J. ISTVT : Transformateur vidéo spatio-temporel interprétable pour Deepfake Détection. IEEETrans. Inf. Sécurité médico-légale. 2023, 18, 1335-1348. [Référence croisée]
11. Liu, Z. ; Lin, Y. ; Cao, Y. ; Hein.; Wei, Y. ; Zhang, Z. ; Lin, S. ; Guo, B. Swin Transformer : Transformateur de vision hiérarchique utilisant Windows décalé. Dans Actes de la conférence internationale IEEE/CVF sur la vision par ordinateur, Montréal, Colombie-Britannique, Canada, 11-17 octobre 2021.
12. Zhong, Z. ; Zheng, L. ; Kang, G. ; Li, S. ; Yang, Y. Augmentation des données par effacement aléatoire. Dans les actes de la conférence AAAI sur Intelligence artificielle, New York, NY, États-Unis, 7-12 février 2020.
13. DFDC Sélim. Disponible en ligne : https://github.com/selimsef/dfdc_deepfake_challenge (consulté le 15 mai 2024).

Machine Translated by Google

14. Chollet, F. Xception : Deep learning avec convolutions séparables en profondeur. Dans Actes de la vision et du modèle par ordinateur Recognition, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017.
15. Lui, K. ; Zhang, X. ; Ren, S. ; Sun, J. Apprentissage résiduel profond pour la reconnaissance d'images. Dans Actes de la conférence IEEE 2016 sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Las Vegas, NV, États-Unis, 27-30 juin 2016.
16. Ni, Y. ; Meng, D. ; Yu, C. ; Quan, CB; Ren, D. ; Zhao, Y. CORE : Apprentissage de représentation cohérente pour la détection de contrefaçon de visage. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 18-24 juin 2022.
17. Soleil, K. ; Yao, T. ; Chen, S. ; Ding, S. ; Li, J. ; Ji, R. Apprentissage contrastif double pour la détection générale des contrefaçons de visage. AAAI Conf. Artif. Intell. 2022, 36, 2316-2324. [Référence croisée]
18. Zhang, J. ; Cheng, K. ; Sovernigo, G. ; Lin, X. Une méthode de détection de Deepfake basée sur l'apprentissage d'un ensemble de fonctionnalités hétérogènes. Dans Actes de l'ICC 2022 — Conférence internationale de l'IEEE sur les communications, Séoul, République de Corée, 16-20 mai 2022 ; pages 2084 à 2089.
19. Rana, MS ; Sung, AH DeepfakeStack : une technique d'apprentissage basée sur un ensemble profond pour la détection des Deepfakes. Dans Actes de la 7e Conférence internationale de l'IEEE 2020 sur la cybersécurité et le cloud computing (CSCloud)/6e Conférence internationale de l'IEEE 2020 sur l'informatique de pointe et le cloud évolutif (EdgeCom), New York, NY, États-Unis, 1er au 3 août 2020 ; pp. 70-75.
20. Ilyas, H. ; Javé, A. ; Malik, KM AVFakeNet : un modèle d'apprentissage profond unifié de bout en bout Dense Swin Transformer pour l'audiovisuel détection des deepfakes. Appl. Informatique douce. 2023, 136, 110124. [Réf. croisée]
21. Khalid, F. ; Akbar, MH; Gul, S. SWYNT : Transformateurs Swin Y-Net pour la détection des Deepfakes. Dans Actes de la Conférence internationale 2023 sur la robotique et l'automatisation dans l'industrie (ICRAI), Peshawar, Pakistan, 3-5 mars 2023 ; p. 1 à 6.
22. Guo, J. ; Deng, J. ; Lattas, A. ; Zafeiriou, S. Redistribution des échantillons et des calculs pour une détection efficace des visages. Dans les actes de la Conférence internationale sur la représentation de l'apprentissage, événement virtuel, 3-7 mai 2021.
23. Zhou, TF; Wang, GT ; Liang, ZY; Shen et JB font face à la médecine légale dans la nature. Dans Actes de la vision et du modèle par ordinateur Reconnaissance (CVPR), Virtuel, 19-25 juin 2021.
24. Kaggle. Disponible en ligne : https://www.kaggle.com/c/deepfake-detection-challenge/overview (consulté le 12 décembre 2023).
25. Li, YZ; Yang, X. ; Soleil, P. ; Qi, HG; Lyu, S. Celeb-DF : Un ensemble de données difficile à grande échelle pour la criminalistique DeepFake. Dans les actes du Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, États-Unis, 14-19 juin 2020.
26. Li, L. ; Bao, J. ; Yang, H. ; Chen, D. ; Wen, F. FaceShifter : Vers un échange de visage haute fidélité et tenant compte de l'occlusion. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Seattle, WA, États-Unis, 13-19 juin 2020.
27. Loshchilov, I. ; Hutter, F. Régularisation de la dégradation du poids découplée. Dans Actes de la Conférence internationale sur les représentations de l'apprentissage, Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 6-9 mai 2019.
28. Gu, Z. ; Chen, Y. ; Yao, T. ; Ding, S. ; Li, J. ; Huang, F. ; Ma, L. Apprentissage des incohérences spatio-temporelles pour la détection de vidéos Deepfake. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, virtuel, 19-25 juin 2021.
29. Li, L. ; Bao, J. ; Zhang, T. ; Yang, H. ; Chen, D. ; Wen, F. ; Guo, B. Radiographie du visage pour une détection plus générale des contrefaçons de visage. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Seattle, WA, États-Unis, 13-19 juin 2020.
30. Zheng, Y. ; Bao, J. ; Chen, D. ; Zeng, M. ; Wen, F. Explorer la cohérence temporelle pour une détection plus générale des faux visages vidéo. Dans Actes de la conférence internationale IEEE/CVF sur la vision par ordinateur, Montréal, QC, Canada, 10-17 octobre 2021 ; pages 15044 à 15054.
31. Halassos, A. ; Vougioukas, K. ; Pétridis, S. ; Pantic, M. Lips ne ment pas : une approche généralisable et robuste pour faire face à la détection des faux. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, virtuelle, 19-25 juin 2021 ; pages 5039 à 5049.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Un réseau de centrales hydroélectriques prosommateurs en tant que système distribué durable Dépôt d'énergie

Michał Morawski et Przemysław Ignaciuk *

Faculté de physique technique, de technologie de l'information et de mathématiques appliquées, Université technologique de Lodz, 93-005 Lodz, Pologne ;
michal.morawski@p.lodz.pl * Correspondance : przemyslaw.ignaciuk@p.lodz.pl

Résumé : La pénurie de dépôts de stockage efficaces et peu coûteux entrave l'adoption à grande échelle de sources d'énergie renouvelables (RSE) volatiles par nature. Dans cet article, nous expliquons comment utiliser des centrales hydroélectriques appartenant à des prosommateurs de quelques à plusieurs kW comme solution de stockage d'énergie distribuée à court terme qui peut être déployée avec peu d'investissement et de faibles dépenses opérationnelles. La solution proposée est un système de dépôts hydroélectriques interconnectés avec un algorithme de contrôle actif du débit d'eau qui réduit la variabilité de la charge du réseau et profite aux prosommateurs. Selon les tests effectués, le chiffre d'affaires des prosumers augmente de quelques pour cent à plus de 30 pour cent, en fonction des conditions météorologiques, par rapport au cas du free flow. À son tour, l'effet d'amortissement du tampon d'énergie distribué équilibre les fluctuations introduites par d'autres RSE, par exemple ceux basés sur le photovoltaïque ou l'éolien. Ainsi, tout en bénéficiant aux parties concernées, cela facilite également l'inclusion des RSE dans le système de distribution d'électricité.

Mots clés : dépôt d'énergie ; centrales hydroélectriques; systèmes distribués

1. Introduction

L'énergie électrique est considérée comme la circulation sanguine de la société d'aujourd'hui. La consommation d'électricité dans les habitations, l'industrie, les transports ainsi que la climatisation et le chauffage des bâtiments entraîne une demande accrue au quotidien. Parallèlement, la production d'énergie reste coûteuse, tant d'un point de vue environnemental qu'économique. La pollution mondiale, le coût croissant des combustibles fossiles et la pression politique ne sont que quelques facteurs qui encouragent la production d'énergie à partir de sources renouvelables (RSE), par exemple le soleil, le vent, les vagues, l'énergie géothermique et le mouvement de l'eau [1]. Malheureusement, la quantité d'énergie récupérée des RSE dépend fortement des conditions météorologiques temporelles. Les RSE fournissent une énergie peu coûteuse soit à des heures aléatoires (vent) ou vers midi (solaire, principalement photovoltaïque (PV)). En revanche, la demande reste à un niveau similaire jusqu'au soir, comme l'illustre la figure 1. Ainsi, des centrales coûteuses alimentées aux combustibles fossiles doivent être exploitées le soir, mais leur activité doit être limitée en faveur des RSE si le le soleil ou le vent sont disponibles. De plus, la production d'énergie à partir des centrales thermiques traditionnelles ne peut pas être trop limitée en raison de facteurs technologiques. En raison de la dynamique du marché, les prix de l'énergie sont fixés à des niveaux bas (voire négatifs) à certains moments pour atteindre ensuite un ordre de grandeur plus élevé quelques heures plus tard, ressemblant à la « courbe du canard » représentée dans la figure 2, qui montre les premiers jours de l'énergie. Juillet 2023 sur le marché polonais de l'énergie. Dans l' intérêt de toutes les parties prenantes, cette disparité devrait être réduite.

Une solution auto-imposée à la disparité producteur-consommateur consiste à stocker l'énergie excédentaire lorsqu'elle est bon marché pour une utilisation ultérieure lorsque des sources coûteuses sont incorporées. Malheureusement, la technologie actuelle ne permet pas d'exécuter cela à plus grande échelle [2]. Par exemple, les centrales hydroélectriques à pompage en Pologne peuvent fournir au maximum 5 % de la demande globale d'électricité, et les dépôts de batteries n'en fournissent qu'1 % au maximum. Ces deux méthodes traditionnelles, ainsi que les futurs systèmes basés sur l'hydrogène, sont coûteuses à déployer et à entretenir. La faible durabilité des batteries électromécaniques limite encore un bon retour sur investissement.

Par conséquent, il est souhaitable de rechercher une nouvelle option à faible CAPEX (dépenses en capital) et à faible OPEX (dépenses opérationnelles) pour le stockage de l'énergie.

check for updates

Citation : Morawski, M. ; Ignaciuk, P. Un réseau de centrales hydroélectriques prosumer en tant que dépôt d'énergie distribuée durable. Électronique 2024, 13, 3043. https://doi.org/10.3390/électronique13153043

Rédacteurs académiques : Temitayo Olowu et Raghav Khanna

Reçu : 24 juin 2024
Révisé : 22 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

Récemment, un changement substantiel a été observé sur le marché de l'électricité. Les grandes centrales électriques traditionnelles sont complétées par des installations à petite échelle installées par les citoyens dans leurs propres locaux. Ces citoyens sont consommateurs d'électricité à certaines heures de la journée et producteurs à d'autres moments et sont donc appelés prosommateurs. D'une part, la popularité des installations prosommateurs favorise l'adoption des RSE ; d'un autre côté, cela menace la stabilité du système d'approvisionnement énergétique en imposant des changements de charge extrêmes aux centrales traditionnelles.

Cette étude contribue aux défis mentionnés ci-dessus des manières suivantes : • Nous proposons d'engager des centrales hydroélectriques prosommateurs avec une puissance de pointe de l'ordre de quelques kW afin de constituer un dépôt d'énergie distribué ;

• Nous concevons un système de contrôle actif, qui permet à la fois d'augmenter les revenus des propriétaires de centrales et de réduire la variabilité de charge imposée aux centrales thermiques existantes (« décapiter le canard » [3]), obtenant ainsi une solution gagnant-gagnant ; • Contrairement à l'approche typique, qui se concentre sur un seul générateur hybride, par exemple [4], nous montrons comment coordonner un réseau d'usines pour un fonctionnement sûr et efficace d'un système distribué.

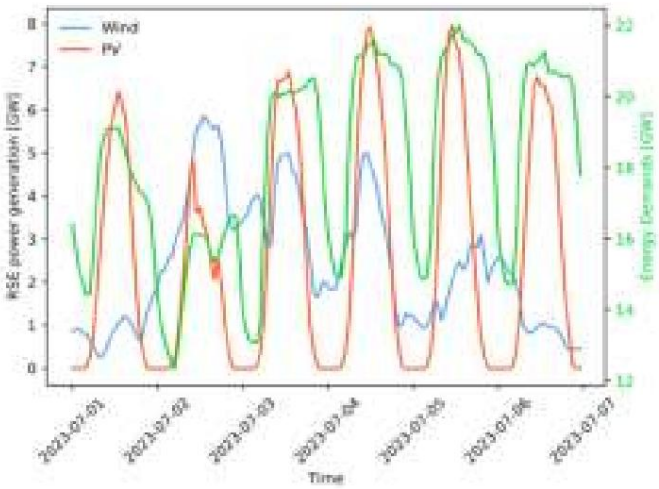


Figure 1. Production d'énergie des principaux RSE et demande énergétique prévue en Pologne du 1er au 6 juillet 2023 (le 1er juillet était un samedi [5]).

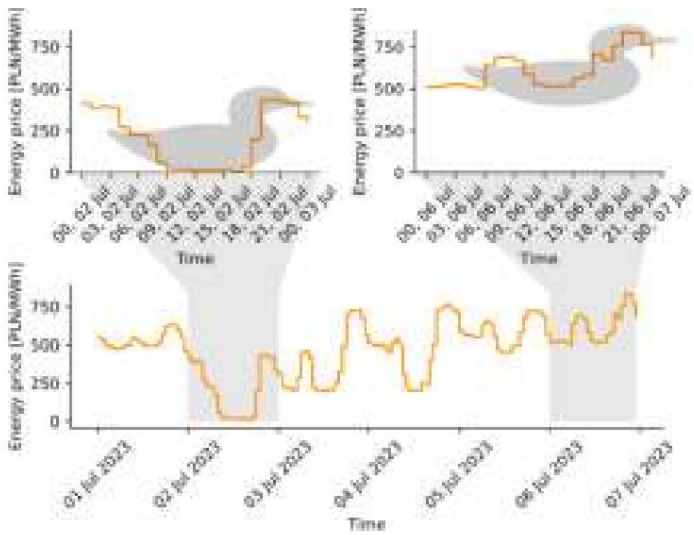


Figure 2. Fluctuation des prix de l'énergie le lendemain [PLN/MWh] sur le marché polonais entre le 1er et le 6 juillet 2023, suivant la « courbe du canard » [5].

Machine Translated by Google

Le reste de l'article est organisé comme suit. Dans la section 2, les méthodes traditionnelles de contrôle des centrales hydroélectriques sont discutées. Dans la section 3, nous expliquons les différences entre les plantes conventionnelles et les plantes prosommatrices. Dans la section 4, un modèle dynamique à temps discret de l'écoulement de l'eau dans un système multi-centrale hydroélectrique est construit et une procédure pour optimiser son fonctionnement est décrite. Dans la section 5, nous évaluons les performances de l'algorithme pour un large spectre de données de test. Ensuite, nous discutons des considérations de mise en œuvre dans la section 6 Enfin, des conclusions sont tirées dans la section 7.

2. Contrôle des centrales

hydroélectriques Dans la littérature, les centrales hydroélectriques (HP) sont classées comme normales (>100 MW), moyennes (<100 MW), petites (<15 MW), mini (<1 MW), micro (<100 MW). kW), ou pico (<5 kW) HP, bien que les valeurs réelles varient selon les régions [6,7]. La plupart des recherches se concentrent sur les petites, moyennes et normales HP, qui jouent un rôle important dans l'approvisionnement en électricité. Dans cet article, en raison de leur importance pour les prosommateurs, les micro- et pico-HP sont étudiés.
Ils englobent de nombreuses usines autrefois abandonnées avec de petits étangs artificiels, des marécages et d'autres formations naturelles, communément appelés HP au fil de l'eau [8,9], nécessitant ainsi des dépenses en capital insignifiantes pour leur déploiement. Par exemple, actuellement, en Pologne, moins de 5 % des installations possibles sont utilisées pour la production d'énergie [10]. De plus, de nombreuses publications de services en ligne montrent que les pico-HP peuvent être facilement déployés sans équipement spécialisé [11]. Ainsi, le domaine cible de l'étude menée dans ce travail est important. Bien entendu, un seul dépôt de prosommateurs ne change pas la donne. Cependant, un ensemble de HP prosommateurs planifiés de manière optimale et axés sur les revenus peut constituer un système de stockage d'énergie efficace, résistant aux perturbations et doté de faibles coûts d'exploitation. En fait, des circonstances similaires ont conduit à la popularité des installations photovoltaïques, qui sont devenues un élément commun du paysage actuel.

Il existe cependant une différence fondamentale entre les installations photovoltaïques et HP. Les centrales photovoltaïques sont indépendantes les unes des autres, alors que le bon fonctionnement d'une centrale haute pression dépend de la mise en cascade de toutes les stations en amont. Dans le passé, la planification du fonctionnement d'une cascade de HP a été étudiée comme une étude de cas [12] plutôt que comme un système en réseau soumis à une action de contrôle, c'est-à-dire que chaque installation était ajustée manuellement sans imposer de cadre commun. Bien qu'un plan de planification approprié puisse être défini de cette manière, il peut ne pas tenir compte des conditions d'exploitation optimales ou présenter un risque en termes de protection contre les sécheresses et les inondations. D'autres approches envisagent des modèles simplifiés, réduisant la cascade à un cas unique [4], où les barrages sont proches [8,13] ou situés sur une rivière mais pas sur ses affluents [9,14]. Une solution conceptuellement la plus proche de celle discutée ici a été proposée dans [13], bien qu'elle cible les grandes installations concentrées et non les HP distribués sous gestion prosommateur.

Techniquement, le pilotage de la production d'énergie dans une centrale hydroélectrique n'est pas un processus complexe. En élevant les déversoirs, on contraint le débit d'eau et, en les abaissant, on augmente la production d'énergie. Cependant, établir la séquence correcte de montée et de descente des déversoirs est loin d'être évident. Habituellement, la stratégie de planification est classée comme à long terme (1 à 5 ans), à moyen terme (3 à 18 mois) et à court terme (2 à 14 jours) [15]. Néanmoins, dans le cas des HP prosommateurs, de telles stratégies sont d'une utilité limitée en raison du petit volume des étangs. Dans le cas considéré, une stratégie de planification significative devrait s'étendre sur quelques heures ou, au maximum, sur une journée. De plus, elle devrait se concentrer sur la réduction du déséquilibre production-consommation le soir et le matin (Figure 2) ou, de manière équivalente, tirer parti des fluctuations des prix du marché résultant de la disparité entre la demande prévue et la demande réelle [16] (Figure 1).

L'ordonnancement optimal du problème de libération d'eau HP a été étudié depuis longtemps ([15, 17] et les références qui y figurent). Cependant, dans ces études, les HP ont été examinés uniquement dans le contexte de la protection contre les inondations/sécheresses ou de la production d'électricité. Ici, un troisième rôle des HP est exploré, à savoir le potentiel de fournir un dépôt d'énergie [2]. Au lieu de se concentrer uniquement sur la quantité d'électricité produite, les HP peuvent limiter le débit du fleuve lorsque l'énergie est bon marché et l'augmenter lorsque le prix augmente, créant ainsi un système efficace.

Machine Translated by Google

tampon énergétique. La quantité globale d'énergie produite restera la même, mais les revenus des propriétaires de HP augmenteront en acceptant les changements à court terme du profil de prix. Simultanément, la fluctuation de la production d'énergie des centrales thermiques traditionnelles diminue. Une idée similaire a été explorée dans [18], mais elle est destinée aux grandes installations, et non aux installations grand public considérées dans ce travail.

3. Centrales hydroélectriques

prosumer Toutes les RSE ne sont pas sensibles à l'influence des fluctuations météorologiques, par exemple les centrales hydroélectriques géothermiques, basées sur la marée ou les grandes centrales hydroélectriques coûteuses [19]. Ici, l'accent est mis sur les petites installations flexibles, c'est-à-dire les micro- [6] et les pico-HP [20]. Ils sont généralement déployés sous forme d' installations au fil de l'eau [8,21], c'est-à-dire sans grands barrages ni réservoirs, et n'entraînent donc pas de dépenses significatives ni d'intrusion dans l'environnement [21]. Contrairement aux HP plus grands, qui ne sont pas affectés par les conditions atmosphériques locales puisque la quantité d'eau prévue est négligeable par rapport au volume du réservoir, l'espace de stockage limité des micro- et pico-réservoirs les rend sensibles à la variabilité météorologique. Par exemple, une tempête locale peut rapidement remplir l'étang à proximité d'un micro-HP tandis qu'une tempête proche présente simultanément des conditions ensoleillées et sèches. Aujourd'hui, la prévision des précipitations n'est pas assez précise pour faire face à de telles situations. Les modèles de ruissellement des eaux ne sont pas non plus précis [22]. Par conséquent, lorsque le temps est instable, le calendrier de l'usine doit être recalculé fréquemment pour ajuster le système aux circonstances les plus récentes ou à la variabilité des prix dans un marché d'équilibrage en temps réel [16]. Contrairement aux approches d'optimisation numérique couramment utilisées, l' algorithme présenté dans ce manuscrit prend une fraction de seconde à s'exécuter, même sur un appareil bas de gamme.

Un ensemble de PAC utilise l'eau des usines et des affluents en amont. Par conséquent, un contrôle inapproprié peut engendrer une inondation. Par conséquent, il est obligatoire de synchroniser le fonctionnement HP, en tenant explicitement compte

de divers facteurs : (1) Facteur géographique : la distance entre les installations et le retard d'acheminement qui en ré
ter refusion;

(2) Facteur lié aux conditions météorologiques : niveau de précipitation prévu et niveau d'incertitude ;
(3) Facteur orienté application : utilisation de la cascade HP comme dépôt d'énergie distribué
combiné avec la fonction commune de production d'électricité.

Habituellement, le calendrier de contrôle est établi à l'aide de procédures d'optimisation numérique, intégrant des techniques d'intelligence artificielle pour réduire la charge de calcul [15, 17, 21-29]. Cependant, ces procédures présentent des problèmes de robustesse dans le domaine d'application considéré, même dans des cas relativement simples [29]. De plus, le temps important nécessaire pour parvenir à une solution (en utilisant des ressources informatiques raisonnables) contredit la nécessité d'adaptabilité du plan, c'est-à-dire d'introduire des modifications dans le programme de contrôle lorsque la météo est instable ou qu'un dysfonctionnement se produit.

Pour capturer les facteurs (1) à (3), des informations sur les différents retards dans les écoulements d'eau sur les liaisons reliant les réservoirs sont explicitement incorporées dans le modèle dynamique construit dans ce travail. En utilisant la représentation dynamique du système, un problème d'optimisation est énoncé. Il peut être résolu analytiquement si la saturation est absente [30]. En revanche, ici, les contraintes naturelles sont intégrées dans la solution algorithmique. Cette proposition apporte des avantages non seulement aux prosommateurs en augmentant leur gain économique, mais également aux gestionnaires de réseaux électriques en réduisant la variation de charge des centrales électriques standard.

4. Modèle de système

Habituellement, la modélisation HP se concentre sur l'optimisation du travail des générateurs, ignorant le système d'alimentation [23]. Ici, le générateur est considéré comme une boîte noire et l' accent est mis sur les HP connectées en tant que système d'approvisionnement en eau. Un point clé à considérer dans un système de refusion d'eau est le temps non négligeable entre l'émission de l'action de contrôle sur un réservoir avant qu'elle n'influence le niveau d'eau sur un réservoir en aval. Par conséquent, contrairement aux modèles antérieurs de réseaux de stockage, par exemple [31], dans l'approche préconisée ici, les principes de contrôle des systèmes de stockage à retardement [32,33] seront appliqués. Cependant, les modèles

Machine Translated by Google

proposés dans [32,33] supposent un ajustement de contrôle en temps continu, ce qui est difficile à réaliser dans un système de contrôle de l'eau en raison des spécificités des composants mécaniques qui dirigent les déversoirs du barrage. Le modèle de ce travail couvre explicitement les effets d'un temps d'échantillonnage fini et sera construit directement dans le domaine du temps discret.

4.1. Dépôt mono-usine

Considérons le modèle d'une seule HP comme élément constitutif du système illustré à la figure 3. La dynamique du budget hydrique de l'usine peut être décrite via la relation récursive

$$sj(k + 1) = sj(k) − fj(k) + \sum_{\text{plantes en amont}} i \; fi(k − Tij) + rj(k), \quad (1)$$

où

- k [1, m] est un instant temporel et m est un horizon de planification ;
- sj (k) est la quantité d'eau stockée dans le réservoir à proximité de l'usine j (sur la figure 3, l'usine j = 3 est représentée dans une vue agrandie) ; sj (k) englobe la construction hydrotechnique ainsi que les marécages et zones similaires à proximité ;
- fj (k) est la quantité d'eau utilisée pour faire fonctionner les groupes électrogènes installés au barrage j dans le temps compris entre les instants k
- et k + 1 ; rj (k) est l'approvisionnement provenant de sources hydrologiques externes comme la pluie (et son ruissellement), la fonte des neiges, les affluents incontrôlés et la vaporisation. Les valeurs rj (k) peuvent être obtenues à partir des prévisions météorologiques et des modèles hydrologiques dans un horizon de planification de m périodes. rj (k) peut être positif (prévalence des précipitations) ou négatif (prévalence de la vaporisation). rj (k) est supposé connu dans le modèle. Lorsque la valeur réelle de rj (k) diffère de la valeur prévue, l'algorithme est réexécuté, ce qui n'implique pas de calculs complexes, comme indiqué à la section 4.3.

Les affluents alimentent le réservoir avec l'eau précédemment utilisée par les plantes en amont. L'eau de l'usine en amont i arrive à l'usine j avec un délai Tij > 0. La durée de la période ∆k, c'est-à-dire le temps entre les instants k et k + 1, peut être choisie arbitrairement, mais selon le rythme d'évolution des prix, il est raisonnable de choisir entre 1 h et 15 min, en fonction des réglementations locales. De même, l'horizon de planification m peut couvrir une fenêtre de 24 heures de prix connus de l'énergie (le marché du lendemain). Le débit initial fj (k ≤ 0) et le niveau d'eau initial sj (0) sont supposés connus. La condition terminale sj (m) peut être sélectionnée arbitrairement.

Le revenu de l'usine obtenu au cours d'une période peut être calculé comme suit :

$$Jj(k) = ηj\, pj(k)fj(k)∆k, \quad (2)$$

où

- pj (k) est le prix de l'énergie à l'instant k. Le fait que tous les HP soient connectés au même système n'induit pas le même profil de prix pour chaque centrale j. Les propriétaires peuvent avoir un contrat avec différentes entreprises, utiliser des tarifs différents ou avoir eux-mêmes des modes de consommation différents ;
- ηj est le rendement des générateurs électriques, intégrant l'impact de la hauteur du barrage. Pour les générateurs prosommateurs des plaines, le débit de 1 m3/s correspond à une production d'électricité de 5 à 7 kW.

Machine Translated by Google

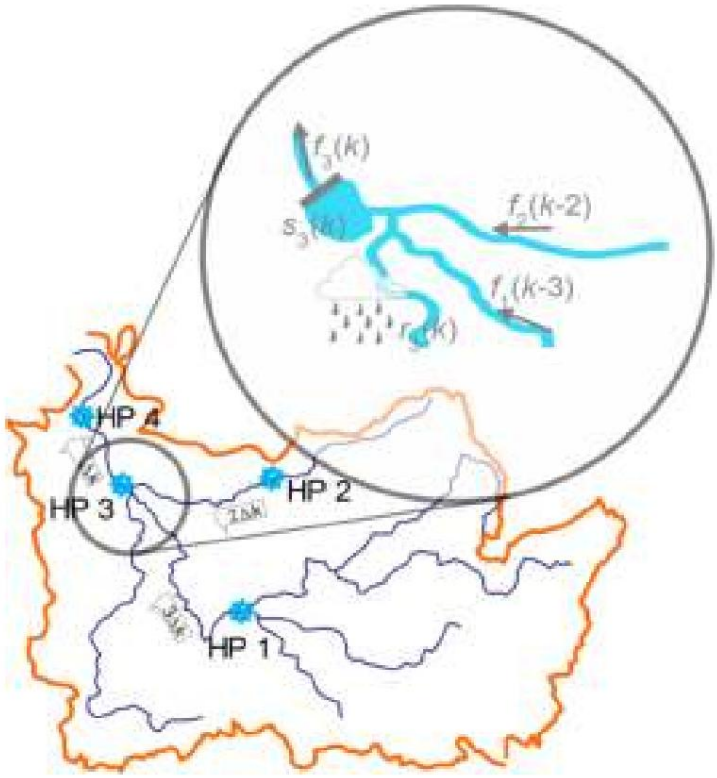


Figure 3. Modèle de centrales hydroélectriques connectées dans un bassin fluvial. L'usine 3 (agrandie) est alimentée par le les apports des réservoirs 1 et 2 avec des retards indiqués par des flèches épaisses (Δk—période d'échantillonnage) et sources exogènes, par exemple pluie ou affluent dans le sud. La quantité d'eau livrée à l'usine à partir de ces sources dans Δk à l'instant k sont respectivement f 1 (k − 3), f 2 (k − 2) et r3 (k). La sortie provenant des générateurs de barrage de l'usine 3 est f 3 (k). La différence de débit d'entrée et de sortie est tamponnée dans le étang, dont le volume d'eau actuel est noté s3 (k).

4.2. Dépôt multi-usines

Comme pour le photovoltaïque, à mesure que le nombre de HP augmente, leur impact sur le réseau augmente. Une collection de pico- et micro-HP peut constituer un vaste dépôt d'énergie distribué.

Dans le cas de n centrales électriques dans un même bassin fluvial, les variables du modèle sont regroupées en vecteurs :

$$s(k) = \begin{bmatrix} s1(k) \\ s2(k) \\ \vdots \\ sn(k) \end{bmatrix}, f(k) = \begin{bmatrix} f1(k) \\ f2(k) \\ \vdots \\ fn(k) \end{bmatrix}, r(k) = \begin{bmatrix} r1(k) \\ r2(k) \\ \vdots \\ rn(k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

où s(k) est le vecteur du niveau d'eau du réservoir, f(k) est le vecteur des volumes d'eau dans les flux inter-réservoirs et r(k) est le vecteur des volumes d'eau provenant de sources exogènes, respectivement.

Dérivée de (1), la dynamique du système en réseau est décrite par

$$s(k+1) = s(k) + \sum_{t=0}^{T} \Theta t f(k-t) + r(k), \quad (4)$$

où T est le délai maximum, et les matrices Θt regroupent les informations sur le géo-topologie graphique et délais de flux, Θt = θij avec θij = 1, si le débit du réservoir j atteint le réservoir i avec un délai t, et sinon, il vaut 0. Θ0 décrit l'écoulement sortant du le système. Contrairement à [13], ici la distance entre les plantes n'est pas négligeable. Pour le exemple de la figure 3, le délai le plus long T = 3 (le débit entre les réservoirs 1 et 3) et

Machine Translated by Google

$$\Theta 0 = \begin{matrix} -1\ 0 & 0\ 0\ 0 \\ 0\ -1\ 0 & \\ 0\ 0\ -1\ 0 & \\ 0\ 0 & 0\ -1 \end{matrix}, \Theta 1 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 1\ 0 \end{matrix}, \Theta 2 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 1\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \end{matrix}, \Theta 3 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 1\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \end{matrix}. \quad (5)$$

Pour le système multi-usines, l'indice de qualité (2) devient

$$J = \sum_{k=1}^{n} J_j = \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} J_j(k) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \eta_j\, p_j(k) f_j(k) \Delta k. \quad (6)$$

Les parties prenantes ont tendance à avoir des objectifs contrastés. Les prosommateurs tentent de maximiser tandis que les gestionnaires de réseau veulent maximiser J. Un moyen pratique de concilier leurs intérêts Jj est un système de prix. L'algorithme présenté dans la dernière partie de cet article satisfait les objectifs des propriétaires de centrales et de réseaux.

4.3. Algorithme de

contrôle Le principal défi pour résoudre le problème (6) concerne la complexité de la dynamique du système provenant de la présence d'un retard non négligeable dans (4). Une difficulté supplémentaire vient des restrictions physiques imposées aux variables f(k) et s(k).

$$\begin{aligned} f_j^{min} \le f_j(k) \le f_j^{max}, \\ s_j^{min} \le s_j(k) \le s_j^{maximale}, \\ s_j(m) = S_j, \end{aligned} \quad (7)$$

où Sj est une valeur terminale arbitrairement choisie.

Comme indiqué ci-dessus, les solveurs standards ne sont pas robustes dans la classe de problèmes considérée ici [15, 17, 21–29]. Par conséquent, pour aborder les aspects informatiques, une procédure d'optimisation min-max en trois étapes décrite à la figure 4 est appliquée. Chaque étape de l'algorithme est expliquée ci-dessous. La communication entre les HP est conforme à la norme industrielle bien connue Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [34], qui assure à la fois la sécurité et la synchronisation entre les contrôleurs de l'usine.

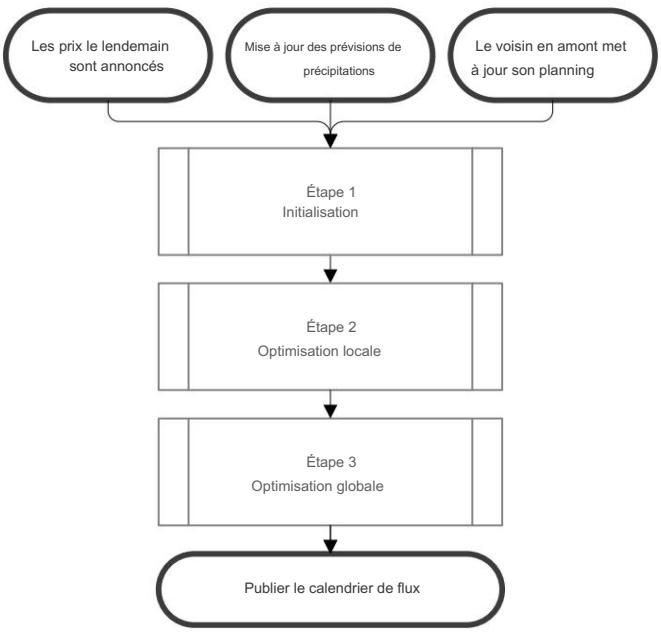


Figure 4. Organigramme de l'algorithme.

Machine Translated by Google

Étape 1, initialisation :

Entrée : profil de prix.

Résultat : programme préliminaire de débit d'eau.

Objectif : Déterminer les intervalles d'accumulation et de gain au cours de la période considérée, comme le montre la figure 5. Lorsque les prix de l'énergie sont supérieurs à la moyenne, il est alors temps de gagner de l'argent (intervalle de gain). Sinon, il faut stocker l'eau (intervalle d'accumulation). Dans le premier cas, f(k) = f max, et dans le second cas, f(k) = f pour chaque k dans l'intervalle respectif. En conséquence, pour l'usine j, des périodes hj de longueur mjp sont obtenues.

Étant donné que les HP sont gérés indépendamment en raison de tarifs ou de demandes différents, le modèle de segmentation peut différer pour chaque HP. Quoi qu'il en soit, cette étape n'implique pas de calculs complexes. L'approximation obtenue à l'étape 1 peut conduire à franchir les limites de s(k) définies en (7).

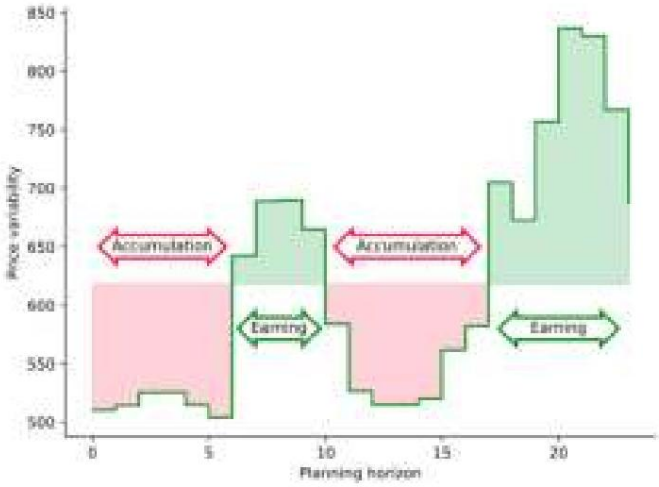


Figure 5. Illustration de l'étape 1 : identification des intervalles d'accumulation et de gain pour le profil de prix à partir du 6 juillet. Les périodes marquées ont un impact sur la version de l'étape 2 de l'algorithme présenté.

Étape 2, optimisation locale :

Entrée : profil de prix et calendrier préliminaire du débit d'eau calculés à l'étape 1, ainsi que le débit entrant (c'est-à-dire la pluie prévue, le débit des affluents, le calendrier des usines en amont) dans le système.

Résultat : programme de flux optimisé localement. Le résultat ne dépasse pas les limites définies en (7).

Objectif : Rechercher le flux optimal au sein de chaque période trouvée par l'exécution de l'étape 1.

Puisqu'il existe deux types de périodes, il est raisonnable de diviser l'étape 2 en conséquence.

Étape 2a (intervalle d'accumulation) : Si, pour tout k, sj (k) > sj max, cela signifie que le débit d'eau est trop contraint. Ainsi, l'afflux d'eau inonde l'étang. Par conséquent, il est souhaitable de trouver l'instant k* avec le prix le plus élevé dans l'intervalle nj et d'augmenter le flux de sj (k*) − sj max, mais pas au-dessus de fj max. Cette étape est répétée jusqu'à ce que la condition sj (k) ≤ sj soit satisfaite pour tout k dans l'intervalle étudié.

Étape 2b (intervalle de gain) : Si, pour tout k, sj (k) < sj min, cela signifie que le flux est excessif. Ainsi, il faut trouver un instant k* avec le prix le plus bas dans cet intervalle et contraindre le flux min par sj qui soit satisfait pour tout k dans l'intervalle étudié.

− sj (k*) mais pas en dessous de fj min. Cette étape est répétée jusqu'à ce que la condition sj (k) ≥ sj

L'étape 2 est exécutée pour chaque HP, en commençant par ceux en amont. Le nombre maximum m2 d'itérations est $\sum_{p}$ pour chaque HP j, ce qui est suffisamment faible pour être exécuté en temps réel, même pour un système à grande échelle. L'étape 2 est illustrée sur la figure 6. Après les calculs, le gain maximum possible est obtenu dans chaque intervalle.

Machine Translated by Google

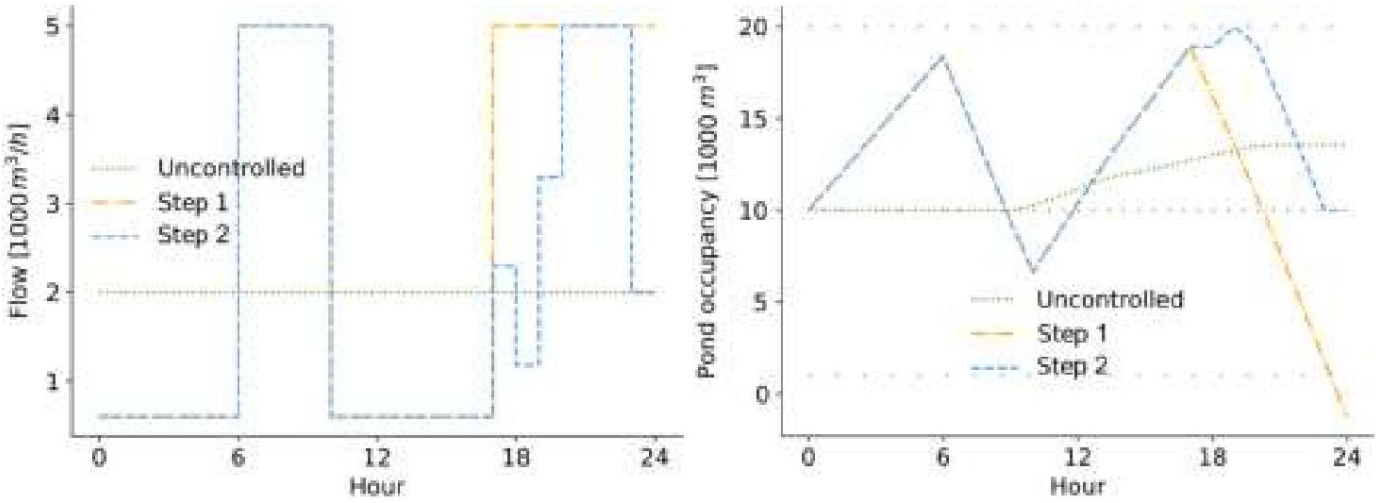


Figure 6. Intensité du flux obtenue à l'étape 2 pour le modèle de la figure 5. Aucune action n'est requise pour les 3 premières périodes. Au cours de la dernière période, la condition terminale s(m) est violée, le flux doit donc être contraint.

Étape 3, optimisation globale :

Entrée : profil de prix et programme de débit d'eau optimisé localement calculé à l'étape 2.
Résultat : programme de flux globalement optimisé.
Objectif : Réordonnancement du débit d'eau sur tout l'horizon d'optimisation.

L'étape 2 aboutit au flux optimal au sein de chaque intervalle de gain/accumulation et garantit que la condition (7) est satisfaite pour chaque intervalle nj . Il est possible qu'il soit possible d'améliorer globalement les performances du système. En observant les événements illustrés sur la figure 6, on peut constater que dans les heures 0 à 19, l'occupation de l'étang augmente de manière non monotone jusqu'à ce que le réservoir se remplisse. Les intervalles de remplissage et de vidange sont délimités par les instants où le bassin est saturé. Le rééchelonnement à l'intérieur de ces intervalles n'influence pas le volume final des réservoirs, il est donc possible d'augmenter le débit lorsque l'énergie est chère et de le diminuer d'autant lorsque le prix de l'énergie est inférieur.

Le nombre maximum d'itérations à l'étape 3 est similaire à celui de l'étape 2. Le résultat de un exemple d'étape 3 est illustré à la figure 7.

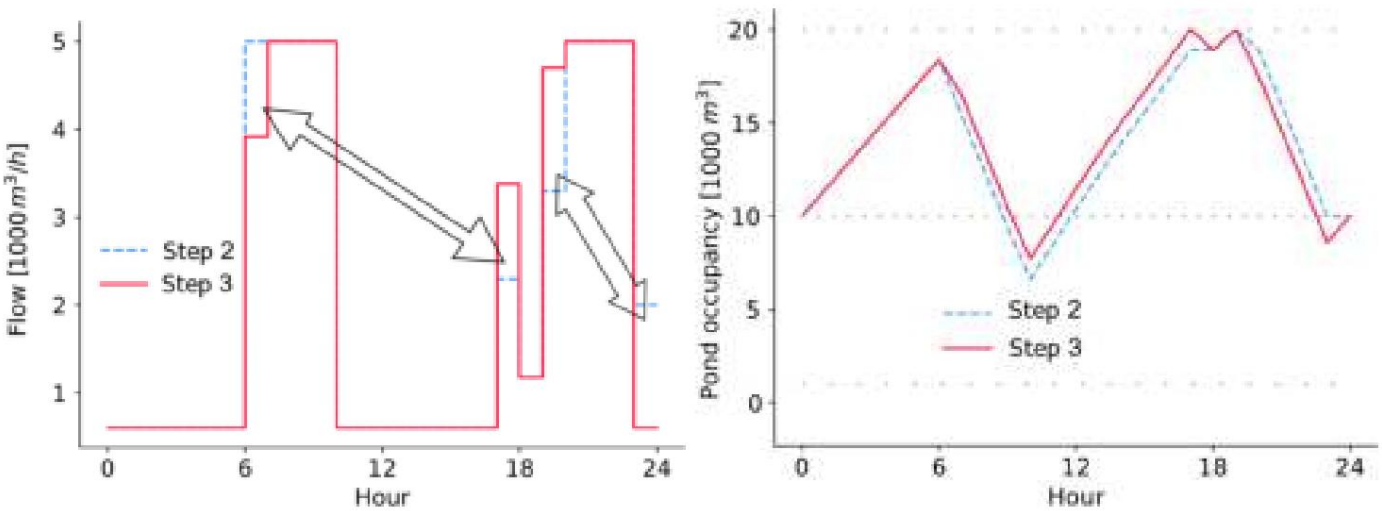


Figure 7. Résultat de l'étape 3 juxtaposé au résultat de l'étape 2 (Figure 6). Les flèches marquent le volume d'eau reprogrammé.

Machine Translated by Google

Considérations finales

L'algorithme est exécuté chaque fois que les valeurs d'entrée changent, par exemple lorsque de nouveaux prix de l'énergie sont annoncés ou qu'une mise à jour des prévisions météorologiques rj (k) est obtenue. Les résultats doivent être diffusés à tous les propriétaires concernés du réseau HP car l'étape 2 de l'algorithme nécessite les résultats des usines en amont. L'algorithme peut être exécuté localement à l'aide d'un matériel peu coûteux, par exemple un microcontrôleur.

5. Évaluation

La topologie à quatre nœuds de la figure 3 a été utilisée pour l'évaluation de l'algorithme. Il est assez simple d'illustrer les propriétés de l'algorithme tout en couvrant les défis majeurs d'un réseau HP prosommateur provenant d'une topologie arborescente et d'un retard non négligeable entre les installations. Aucune gestion commune n'est supposée : les prosommateurs prennent les décisions de contrôle dans leurs usines indépendamment les uns des autres. Seule la diffusion des décisions de contrôle est nécessaire. Des réglementations formelles peuvent facilement l'appliquer.

L'algorithme de la section 4 a été testé en utilisant divers profils de prix tirés de [5], y compris ceux illustrés dans la figure 2, en présence d'une vague mobile de pluie intense et du ruissellement correspondant représenté dans la figure 8. Les calculs ont été exécutés pour chaque profil. et différents volumes d'étangs. Dans tous les cas, un flux exogène d' intensité constante f(k) = [2, 3, 5, 5] × 103 [m3/h] alimente le système. Les autres paramètres du système sont = [0,5, 0,6, 1, 1] × 103 [m3/h], s(0) = s(m), pris comme f max min s = [5, 6, 10, 10] × 103 [m3/h], f min = 0,1 × s(0), s = 2 × s(0), avec le niveau d'eau initial s(0) défini comme suit : Scénario 1 (réservoirs de petite taille) : s(0) = s(m) = [0,5, 0,75, 1,25, 1,25] × 104 [m3] ; Scénario 2 (réservoirs de taille moyenne) : s(0) = s(m) = [1, 1,5, 2,5, 2,5] × 104 [m3] ; Scénario 3 (grands réservoirs) : les HP sont reliées à des lacs artificiels plus grands avec une probabilité de saturation négligeable, s(0) = s(m) = [2, 3, 5, 5] × 104 [m3].

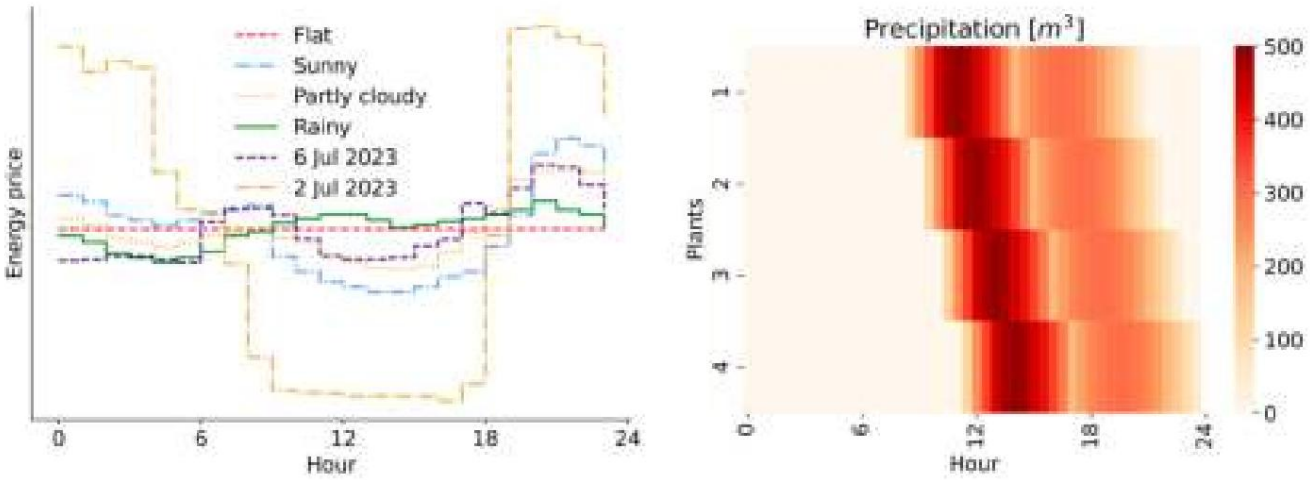


Figure 8. Exemples de profils de prix adaptés à la même moyenne et au même modèle de précipitations supposé avec le ruissellement utilisé pour valider les résultats.

Bien que l'algorithme n'attende aucune relation spécifique entre les profils de prix, pour des raisons de lisibilité, tous les HP partagent les mêmes données. Pour cette raison, la puissance de la turbine est également considérée comme une fonction linéaire de l'intensité du débit nj (fj (k)) = const.

Le tableau 1 résume le gain pour le prosommateur et le gain global pour le gestionnaire de réseau. Le gain s'établit par rapport au cas où les HP ne sont pas contrôlés. L'écart à l'état final en flux libre est comblé ou libéré au prix moyen.

Machine Translated by Google

Tableau 1. Gain de profit [%] par rapport au flux libre [m3] pour les profils de prix de la figure 7 et différents tailles de réservoir.

Profil	Plante 1	Plante 2	Usine 3	Usine 4	Toutes les usines	Étangs de petit	Remarque
volume (scénario 1)							
Ensoleillé	10,85	11.80	10,98	6,74	9,71		
Partiellement nuageux	4,52	4.80	6,95	1,69	4,44		
Pluvieux	2,54	2.41	6,62	198,52	34.55		Lorsque l'usine 4 est laissée incontrôlée, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 5 h.
6 juillet 2023	10h13	10h35	13,39	28,16	17h30		
2 juillet 2023	29h25	33,81	59,53	46,64	47h30		
Étangs à volume moyen (scénario 2)							
Ensoleillé	20.13	19h38	15,91	11,44	15,65		
Partiellement nuageux	11,98	12.07	13.86	38.17	21.29		Lorsque l'usine 4 est laissée incontrôlée, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 3 h.
Pluvieux	9h31	11h37	17h44	65.61	33.05		Lorsque les usines 3 et 4 ne sont pas contrôlées, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 5 h (les deux), et l'usine 3 subit une inondation pendant 2 h.
6 juillet 2023	14h47	13.77	14h25	49.92	25h15		Lorsque l'usine 4 est laissée incontrôlée, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 4 h.
2 juillet 2023	68,50	68.34	69,79	82,83	74.03		Lorsque l'usine 4 est laissée incontrôlée, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 2 h.
Étangs à grand volume (scénario 3)							
Ensoleillé	21.04	20.82	19,52	16,15	18,86		
Partiellement nuageux	14.73	14.72	14h43	19h43	16.76		Lorsque l'usine 4 est laissée incontrôlée, alors le la production descend en dessous du minimum pendant 1 h.
Pluvieux	6,93	6,79	6,61	5,78	6.41		
6 juillet 2023	15,39	15,18	13,83	12,36	13.82		
2 juillet 2023	59,52	56,83	80,13	65,47	67,83		

Les données présentées dans le tableau 1 révèlent que plus le volume de l'étang est grand, plus le profit est important. obtenu. Cependant, avec l'algorithme proposé appliqué, même pour les petits réservoirs, le l'avantage monétaire relatif atteint plusieurs dizaines et augmente avec la variabilité des prix, mais pas linéairement. Les données montrent également que de petits changements dans rj (k) ou pj (k) peuvent conduire à une augmentation substantielle divergence dans le résultat. Le gain augmente lorsque la distance entre les HP augmente, ce qui est attribué à une plus grande différence entre pj (k) et pj (k − Tij). Il est à noter que l'algorithme a tendance à remplir les étangs à bas prix vers minuit mais ne permet pas pour les inondations. Ce comportement est avantageux car les étangs contribuent à l'humidité du sol, donc atténuer le problème des sécheresses persistantes dans diverses régions.

L'algorithme opte pour l'intensité de flux maximale ou minimale f(k) plutôt que pour les intermédiaires. Cette propriété facilite la construction et l'entretien des turbines en augmentation de l'efficacité dans les conditions nominales.

Les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme proposé, résumés dans le tableau 1, sont très meilleurs que ceux obtenus par les algorithmes d'optimisation standards [29]. De plus, tous les les HP en aval sont protégés des inondations et des sécheresses autrement courantes (scénario 2).

Le marché d'équilibrage peut générer des bénéfices supplémentaires à la fois pour les prosommateurs et pour le réseau. opérateurs [16]. Lorsque le gestionnaire de réseau auquel le réseau prosumer est connecté détecte manque d'énergie, il peut déclencher un dégagement d'eau immédiat ou, à l'inverse, contraindre le flux en cas d'excédent.

6. Aspects de mise en œuvre

Avant le déploiement, quelques aspects supplémentaires doivent être pris en compte :

1. Questions juridiques. Le déploiement du système nécessite l'accord du régulateur des ressources en eau et les accords correspondants des gestionnaires de réseau.
2. Échange d'informations. L'algorithme conçu nécessite une communication fiable plateforme parmi les plantes prosommatrices. Nous proposons MQTT [35] à cet effet.

Machine Translated by Google

3. Prévisions météorologiques. Les prévisions pour le lendemain ne sont actuellement pas suffisamment précises pour prévoir les tempêtes locales plusieurs heures à l'avance. Cependant, l'imagerie radar fournit des estimations détaillées des précipitations sur une période de quelques heures.
4. Les dépôts comme système en temps réel. Le contrôleur de chaque HP fonctionne indépendamment des autres. Par conséquent, le système est potentiellement sujet à des phénomènes défavorables provenant de systèmes distribués tels que des rushes ou des blocages. Le protocole MQTT résout ce problème sans augmenter la charge de calcul, car le calcul du calendrier ne prend qu'une fraction de seconde et les mises à jour des prévisions sont peu fréquentes.
5. Les dépôts comme système de contrôle. Le système fonctionne en boucle ouverte. Les mises à jour du planning impactent uniquement les HP en aval. Le système est stable à entrées limitées et sorties limitées (BIBO).
6. Sécurité. La plateforme de communication proposée est conforme aux normes de haute sécurité de l'industrie normes [35].
7. Ressources informatiques. L'algorithme proposé ne nécessite pas de ressources informatiques haut de gamme pour s'exécuter. Il fonctionne et communique efficacement sur des appareils bas de gamme et peu coûteux.

7. Conclusions

Cet article présente une stratégie optimale pour contrôler un système de HP connectés, formant un dépôt d'énergie durable et distribué. Un tel système profite à la fois aux gestionnaires de réseaux électriques en réduisant les fluctuations de la charge du réseau et aux propriétaires d'installations en augmentant leurs revenus. Il peut être déployé avec de faibles dépenses d'investissement et d'exploitation. De plus, en ralentissant le ruissellement des précipitations, le système augmente la résilience aux inondations et aux sécheresses dans la région, ce qui revêt une importance primordiale face au changement climatique. L'algorithme de contrôle ne suppose pas le même modèle de prix ni le même horizon de planification utilisé par les différentes parties prenantes. Les propriétaires de HP ne sont pas obligés de coopérer : il leur suffit de diffuser leurs décisions de contrôle aux voisins. Contrairement au « combat contre les onduleurs » photovoltaïques néfastes [35], la coopération entre les prosommateurs dans le cadre du projet proposé augmente leurs profits. De plus, contrairement aux HP pompés, l'accumulation d'énergie n'entraîne pas de coûts supplémentaires, de sorte que même de petites variations de prix permettent d'augmenter les revenus.

L'algorithme présenté est plus performant que les procédures d'optimisation classiques en termes de stabilité numérique et de robustesse [29]. Il peut être mis en œuvre avec des ressources informatiques négligeables et déclenché de manière asynchrone au niveau des HP. Même si le revenu final dépend de la météo, de la précision des prévisions, de la variabilité des prix de l'énergie et d'autres conditions externes, l'augmentation par rapport à un cas non contrôlé se situe dans la fourchette de 20 à 70 % et devrait croître avec l'impact des RSE, en particulier le photovoltaïque. et les RSE éoliens.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, MM et PI ; méthodologie, MM; logiciel, MM; validation, MM et PI ; analyse formelle, MM et PI ; enquête, MM; ressources, MM et PI ; conservation des données, MM et PI ; rédaction – préparation du projet original, MM ; rédaction – révision et édition, PI ; visualisation, MM et PI ; supervision, IP ; administration de projet, PI ; acquisition de financement, PI
Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet no. 2021/41/B/ST7/00108 : « Solutions de contrôle robustes pour les flux en réseau multicanaux », financé par le Centre National des Sciences , Pologne.

Déclaration de disponibilité des données : toutes les données sont disponibles publiquement [5].

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts. Les bailleurs de fonds n'ont joué aucun rôle dans la conception de l'étude ; dans la collecte, l'analyse ou l'interprétation des données ; dans la rédaction du manuscrit ; ou dans la décision de publier les résultats.

Les références

1. Kolosok, S. ; Bilan ; Vassilieva, T. ; Wojciechowski, A. ; Morawski, M. Une étude exploratoire des énergies renouvelables, de la durabilité et de la environnement. Énergies 2021, 14, 4490. [CrossRef]

Machine Translated by Google

2. Rahman, MM ; Oni, AO; Gemechu, E. ; Kumar, A. Évaluation des technologies de stockage d'énergie : une revue. Convertisseurs d'énergie. Gérer. 2020, 223, 113295. [Réf. croisée]
3. Wirfs-Brock, J. IE Questions : Pourquoi la Californie essaie-t-elle de décapiter le canard ? 2014. Disponible en ligne : https://insideenergy.org/2014/10/02/ie-questions-pourquoi-la-californie-essaye-de-décapiter-le-canard/ (consulté le 12 mai 2023).
4. Borkowski, D. ; Cholewa, D. ; Korze 'n, A. Un système hybride de batterie hydro-PV au fil de l'eau en tant que fournisseur d'énergie pour les charges locales. Énergies 2021, 14, 5160. [CrossRef]
5.EPS . Prix de l'énergie du marché. Disponible en ligne : https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb/raporty-dobowe-z- funkcjonowania-rb/podstawowe-wskazniki-cenowe-i-kosztowe/rynkowa-cena-energii-elektrycznej-rce (consulté le 1er août 2023).
6. Anaza, SO ; Abdulazeez, MS; Yisah, YA; Yusuf, YO ; Salawu, BU ; Momoh, SU Production d'énergie micro-hydroélectrique - Un Aperçu. Suis. J. Ing. Rés. 2017, 6, 5-12.
7. Sachdev, H. ; Akella, AK ; Kumar, N. Analyse et évaluation des petites centrales hydroélectriques : une enquête bibliographique. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév. 2015, 51, 1013-1022. [Référence croisée]
8. Yiwei, Q. ; Jin, L. ; Liu, F. ; Dai, N. ; Chanson, Y. ; Chen, G. ; Ding, L. Régulation tertiaire de l'hydroélectricité au fil de l'eau en cascade dans le système d'énergie renouvelable insulaire en tenant compte de la dynamique à plusieurs échelles de temps. IET Renouveler. Générateur d'énergie. 2021, 15, 1778-1795.
9. Jamali, S. ; Jamali, B. Fonctionnement optimal des systèmes hydroélectriques Cascade : implications pour les systèmes hydroélectriques du Grand Karun en Iran. Appl. Sciences de l'eau. 2019, 9, 66. [Réf. croisée]
10. Wyszkowski, K. ; Piwowarek, Z. ; Pałejko, Z. Małe Elektrowne Wodne w Polsce. Rapport technique, ONU Global. 2022. Disponible en ligne : https://ungc.org.pl/wp-content/uploads/2022/03/Raport_Male_elektrownie_wodne_w_Polsce.pdf (consulté le 1er juin 2024). (En polonais).
11. YouTube. Canal général de constriction. 2024. Disponible en ligne : https://www.youtube.com/watch?v=MBDV_Xj6Dj8 (accédé le 1er juin 2024).
12. AIE Hydroélectricité. Modèles de gestion des réservoirs en cascade hydroélectriques, compilation de cas. Rapport technique. 2021. Disponible en ligne : https://www.ieahydro.org/media/02e6ec8e/EAHydro_AnnexXIV_Management%20Models%20for%20Hydropower% 20Cascade%20Réservoirs_CASE%20COMPILATION.pdf (consulté le 1er juin 2024).
13. Yu, Y. ; Wu, Y. ; Sheng, Q. Stratégie de planification optimale des centrales hydroélectriques en cascade dans le cadre du marché commun de l'énergie journalière et régulation de fréquence. Accès IEEE 2021, 9, 87749-87762. [Référence croisée]
14. Zhang, H. ; Chang, J. ; Gao, C. ; Wu, H. ; Wang, Y. ; Lei, K. ; Longue, R. ; Zhang, L. Exploitation des centrales hydroélectriques Cascade en considérant exigences écologiques globales en eau. Convertisseurs d'énergie. Gérer. 2019, 180, 119-133. [Référence croisée]
15. Thaeer Hammid, A. ; Awad, OI ; Sulaiman, MH; Gunasekaran, SS ; Mostafa, SA; Manoj Kumar, N. ; Khalaf, BA; Al-Jawhar, YA ; Abdulhasan, RA Un examen des algorithmes d'optimisation pour résoudre les problèmes de planification de la production hydroélectrique. Énergies 2020, 13, 2787. [CrossRef]
16. Mielczarski, W. Systèmes et marchés énergétiques ; Association des ingénieurs électriciens polonais : Warszawa, Pologne, 2018.
17. Singh, VK ; Singal, S. Exploitation des centrales hydroélectriques – Une revue. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév. 2017, 69, 610-619. [Référence croisée]
18. Li, J. ; Zhao, Z. ; Lèvre.; Mahmud, MA; Liu, Y. ; Chen, D. ; Han, W. Évaluations complètes des avantages pour l'intégration hors rivière stockage hydraulique par pompage et photovoltaïque flottant. Convertisseurs d'énergie. Gérer. 2023, 296, 117651. [Réf. croisée]
19. Wijesinghe, A. ; Lai, L. Analyse et développement de petites centrales hydroélectriques. Dans Actes de la 4e Conférence internationale 2011 sur la déréglementation et la restructuration des services publics d'électricité et les technologies de l'énergie (DRPT), Weihai, Chine, 6-9 juillet 2011 ; p. 25-30.
20. Khomsah, A. ; Laksono, AS Pico-hydro en tant qu'énergie renouvelable : ressources naturelles locales et disponibilité des équipements dans les efforts de production d'électricité. IOP Conf. Ser. Maître. Sci. Ing. 2018, 462, 012047. [Référence croisée]
21.Anderson , D. ; Moggridge, H. ; Warren, P. ; Shucksmith, J. Les impacts de l'hydroélectricité « au fil de l'eau » sur les aspects physiques et écologiques état des rivières. Eau Environnement. J. 2015, 29, 268-276. [Référence croisée]
22. Nguyen, A. ; Vu, V. ; Hoang, D. ; Nguyen, T. ; Nguyen, K. ; Nguyen, P. ; Ji, Y. Modèle d'ensemble attentionnel pour une prévision précise du débit et du niveau d'eau avec amélioration des données de formation. Ing. Appl. Artif. Intell. 2023, 126, 107073. [Réf. croisée]
23. Alvarez, G. Un modèle d'optimisation pour les opérations de centrales hydroélectriques à grande échelle. IEEE Lat. Suis. Trans. 2020, 18, 1631-1638. [Référence croisée]
24. Shaw, AR; Sawyer, H. ; LeBœuf, E. ; McDonald, M. ; Hadjerioua, B. Optimisation de l'hydroélectricité à l'aide de modèles de substitution de réseaux neuronaux artificiels d'un modèle d'hydrodynamique et de qualité de l'eau haute fidélité. Ressource en eau. Rés. 2017, 53, 9444-9461. [Référence croisée]
25. Ahmadianfar, I. ; Samadi-Koucheksaraee, A. ; Asadzadeh, M. Extraire les règles de fonctionnement non linéaires des systèmes multi-réservoirs en utilisant une méthode d'optimisation efficace. Sci. Rep.2022 , 12, 18880. [CrossRef]
26. Bernardes, J., Jr. ; Santos, M. ; Abreu, T. ; Prado, L., Jr. ; Miranda, D. ; Julio, R. ; Viana, P. ; Fonseca, M. ; Bortoni, E. ; Bastos, GS Optimisation de l'exploitation hydroélectrique à l'aide de l'apprentissage automatique : une revue systématique. AI 2022, 3, 78-99. [Référence croisée]
27. Marcelino, CG ; Leite, GMC ; Delgado, CADM; de Oliveira, LB; Wanner, EF; Jiménez-Fernández, S. ; Salcedo-Sanz, S. Une approche évolutive multi-objectif efficace pour résoudre le fonctionnement de la planification des systèmes multi-réservoirs dans les centrales hydroélectriques . Système expert. Appl. 2021, 185, 115638. [Réf. croisée]
28. Linke, H. Un contrôleur prédictif modèle pour une utilisation optimale de l'hydroélectricité des réservoirs fluviaux. Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2010 sur les applications de contrôle, Yokohama, Japon, 8-10 septembre 2010 ; pages 1868-1873.
29. Morawski, M. ; Ignaciuk, P. Équilibrer le budget énergétique dans les installations de stations d'eau prosommateurs en tenant compte explicitement du retard d'écoulement. IFAC-PapersOnLine 2023, 56, 11748-11753. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

30. Ignaciuk, P. ; Morawski, M. Contrôle optimal des centrales hydroélectriques Cascade en tant que dépôt d'énergie distribué orienté vers les prosommateurs. Énergies 2024, 17, 469. [Réf. croisée]

31. Danielson, C. ; Borrellia, F. ; Olivier, D. ; Anderson, D. ; Phillips, T. Contrôle de flux contraint dans les réseaux de stockage : capacité maximisation et équilibrage. Automatique 2013, 49, 2612-2621. [Référence croisée]

32. Bassin, MV ; Guerra-Avellaneda, F. ; Shtessel, YB Problème de gestion des stocks : continu convergent adaptatif à temps fixe conception du contrôleur. IEEETrans. Système. Homme Cybern. Système. 2020, 50, 4974-4983. [Référence croisée]

33. Ignaciuk, P. Compensation des temps morts dans les systèmes d'inventaire de produits périssables à examen continu avec plusieurs alternatives d'approvisionnement. J. Contrôle des processus 2012, 22, 915-924. [Référence croisée]

34. Sengul, C. Profil de transport de télémétrie Message Queuing (MQTT) et de sécurité de la couche de transport (TLS) du cadre d'authentification et d'autorisation pour les environnements contraints (ACE) ; RFC 9431. 2023. Disponible en ligne : https://datatracker.ietf.org/ doc/rfc9431/ (consulté le 1er juin 2024).

35. Gu, Y. ; Vert, stabilité du système électrique TC avec une pénétration élevée des ressources basées sur l'onduleur. Proc. IEEE 2023, 111, 832-853. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Accélération de réseau neuronal économe en énergie utilisant la plupart Multiplicateur approximatif significatif guidé par bits

Pengfei Huang, Bin Gong, Ke Chen* et Chenghua Wang

Collège d'ingénierie électronique et de l'information, Université d'aéronautique et d'astronautique de Nanjing, n° 29 Jiangjun Avenue, district de Jiangning, Nanjing 210016, Chine ; pfhuang@nuaa.edu.cn (PH); bingong@nuaa.edu.cn (BG); chwang@nuaa.edu.cn (CW)
* Correspondance : chen.ke@nuaa.edu.cn

Résumé : Les exigences informatiques croissantes de l'apprentissage profond et des modèles à grande échelle ont conduit à une augmentation significative de la consommation d'énergie, soulignant le besoin urgent de conceptions matérielles plus économes en énergie . Cette étude présente une nouvelle stratégie d'approximation de poids spécifiquement conçue pour les réseaux de neurones quantifiés (NN), aboutissant au développement d'un multiplicateur approximatif efficace exploitant le décalage du plus significatif (MSO). Comparée aux multiplicateurs approximatifs logarithmiques économes en énergie et aux multiplicateurs approximatifs non logarithmiques axés sur la précision, notre conception de type logarithmique proposée atteint un équilibre sans précédent entre la précision et les coûts matériels. Par rapport au multiplicateur exact de base, notre conception innovante présente des réductions remarquables, comprenant une diminution allant jusqu'à 28,31 % de la surface, une réduction notable de 57,84 % de la consommation d'énergie et une diminution de 11,86 % du retard. Les résultats expérimentaux révèlent que le multiplicateur proposé, lorsqu'il est appliqué aux réseaux de neurones, peut conserver environ 60 % de l'énergie sans compromettre la précision des tâches. Parallèlement, des expériences axées sur l'accélérateur de transformateur et le traitement d'images illustrent les économies d'énergie substantielles qui peuvent être obtenues pour les grands modèles linguistiques (LLM) et les tâches de traitement d'images grâce à la mise en œuvre de la conception proposée, validant ainsi son efficacité et son caractère pratique.

Mots-clés : calcul approximatif ; grand modèle de langage ; coefficient multiplicateur ; multiplicateur logarithmique

check for updates

Citation : Huang, P. ; Gong, B. ; Chen, K. ; Wang, C. Accélération du réseau neuronal économe en énergie à l'aide du multiplicateur approximatif guidé par bits le plus significatif. Électronique 2024, 13, 3034. https://doi.org/10.3390/électronique13153034

Rédacteurs académiques : Ke Xie, Shoue Chen et Xiaolong Wang

Reçu : 5 juillet 2024
Révisé : 30 juillet 2024
Accepté : 31 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Le domaine de l'intelligence artificielle a connu des progrès significatifs, notamment avec l'émergence des réseaux de neurones profonds (DNN) et des Large Language Models (LLM). Cependant, ces modèles sophistiqués ont introduit des défis considérables en matière de calcul et de mémoire, dus à leur taille toujours croissante, comme analysé en profondeur dans [1]. Ces défis sont encore plus aigus pour les appareils de pointe, qui sont limités par des limitations inhérentes liées à leur puissance de calcul. Pour permettre le déploiement pratique de réseaux de neurones (NN) sur des plates-formes de périphérie, diverses techniques logicielles de compression de modèles , telles que la quantification et l'élagage, ont été présentées comme des solutions réalisables. De plus, des efforts récents exploitant le paradigme du calcul approximatif (AxC) au niveau du circuit ont démontré de manière convaincante sa capacité à améliorer les performances du système [2]. Cette amélioration résulte de la réduction de la complexité de calcul et des besoins en mémoire, obtenue en remplaçant des éléments arithmétiques précis par leurs équivalents moins précis. Les opérations clés des processeurs arithmétiques, à savoir la multiplication et l'addition, ont un impact significatif sur leur consommation énergétique globale. Notamment, la multiplication consomme plus d'énergie que l'addition. Le calcul arithmétique de base effectué dans les NN est l'opération de multiplication-accumulation (MAC). Alors que des millions d'opérations de multiplication sont effectuées par un accélérateur NN, les multiplicateurs approximatifs (AM) ont retenu l'attention de nombreux chercheurs en raison de leur importance considérable en termes d' amélioration de l'efficacité et de la précision des applications de réseaux neuron

Machine Translated by Google

Des recherches antérieures sur les multiplicateurs approximatifs personnalisés pour les DNN ont donné des résultats encourageants en termes d'efficacité [6]. Dans le cas du déploiement de NN sur des appareils périphériques aux ressources limitées, l'emploi de multiplicateurs approximatifs constitue un moyen attrayant pour trouver un équilibre entre précision et coût énergétique. Cette réalisation repose sur l'allègement et l'assouplissement des exigences strictes pour des résultats de multiplication parfaitement précis, facilitant ainsi la création de conceptions matérielles approximatives plus économes en ressources et en énergie. L'étude de [7] a démontré l'efficacité d' AxC dans les DNN en présentant une nouvelle couche AxC DNN qui intègre des multiplicateurs approximatifs dans le processus de conception de DNN. Dans [8], trois multiplicateurs approximatifs hybrides ont été proposés en utilisant des portes NAND au lieu de portes ET et en appliquant différentes combinaisons de compresseurs pour fournir divers compromis entre précision et efficacité matérielle. Une conception de multiplicateur approximatif adaptable open source, pilotée par la distribution et la polarité des entrées, a été suggérée dans [9] pour générer des multiplicateurs approxi Le but est de minimiser le carré moyen de l'erreur absolue d'un multiplicateur approximatif basé sur les distributions de probabilité des opérandes extraits de l'application cible, en tenant compte de la polarité d'entrée. Dans [10], une méthodologie pour concevoir des multiplicateurs de tableau approximatifs tirant parti du concept de non-prise en compte du report a été introduite. Grâce à la sélection stratégique des positions à ne pas tenir compte du transport, il devient possible d'ignorer un petit nombre de transports, obtenant ainsi une vitesse améliorée et une zone réduite tout en maintenant simultanément une précision globale supérieure et en garantissant l'adéquation à l'application prévue.

Les multiplicateurs logarithmiques approximatifs fournissent une conception plus simple mais conduisent à une perte de précision nettement plus élevée, tandis que les multiplicateurs approximatifs non logarithmiques démontrent une erreur de calcul plus faible au prix d'une complexité de conception accrue [11]. Pour répondre au besoin de réduction de la consommation d'énergie tout en maintenant une perte de précision acceptable, cette étude propose un multiplicateur de changement de vitesse à un moteur (MSAM) le plus économe en énergie.

Le MSAM peut obtenir une gamme de conceptions de multiplicateurs très efficaces en configurant dynamiquement le facteur d'approximation (k) et le facteur de précision (m). En tirant parti du facteur d'approximation (k), le multiplicateur est stratégiquement divisé en sous-multiplicateurs exacts et approximatifs. Dans la région d'approximation, le principe du multiplicateur à coefficient constant reconfigurable (RCCM) [12] est appliqué, remplaçant les opérations de multiplication conventionnelles par des opérations de décalage, d'addition et de soustraction. Cet article de revue s'appuie sur et étend notre précédent article de conférence [13], offrant plusieurs différences clés et de nouvelles contributions. Un résumé de ces avancées est fourni ci-dessous : • Nous avons conçu une

stratégie d'approximation alternative et plus agressive pour le processus d'approximation multiplicateur, repoussant les limites des compromis précision-efficacité. • Nous avons en outre effectué une analyse complète des erreurs et discuté en profondeur des

compromis entre la précision et la consommation d'énergie.

• En plus d'analyser des ensembles de données populaires, nous explorons également le traitement d'images à l'aide de différents schémas

AxC. • Les avantages de nos modèles de multiplicateurs approximatifs proposés sont étayés par une analyse théorique rigoureuse et des démonstrations expérimentales approfondies.

Le reste de cet article est structuré comme suit : Dans la section 2, un examen concis du contexte et des travaux connexes est proposé. La section 3 détaille notre méthodologie innovante pour l'accélération des réseaux neuronaux économes en énergie, incorporant un multiplicateur approximatif dynamique guidé par bits le plus important pour améliorer considérablement les performances. Dans la section 4, une analyse des erreurs et des résultats de simulation sont fournis. Enfin, la section 5 conclut l'article.

2. Préliminaires

Un multiplicateur logarithmique (LM) convertit les nombres au format binaire en format logarithmique, facilitant ainsi la transformation de la multiplication à l'addition. L'algorithme de Mitchell a été initialement proposé dans [14]. Étant donné deux nombres binaires A et B, où A = 2 k1 (1 + x1

Machine Translated by Google

et B = 2 k2 (1 + x2), le multiplicateur logarithmique les convertit initialement en leur valeur logarithmique se forme comme suit :

$$\log2 (A \cdot B) = \log2 (2\ k1+k2\ (1 + x1)(1 + x2)) = (k1 + k2) + \log2 (1 + x1) + \log2 (1 + x2), \quad (1)$$

où k1 et k2 désignent les positions du bit le plus significatif (avec une valeur de 1) dans les opérandes A et B, respectivement, et x1 et x2 représentent les parties fractionnaires de A et B (x1, x2 [0, 1]) . Dans l'algorithme de Mitchell, lorsque 0 ≤ x < 1, l'expression log2 (1 + x) est approximativement égale à x. Le logarithme du produit peut donc être exprimé comme suit:

$$\log2 (A \cdot B) \approx k1 + k2 + x1 + x2. \quad (2)$$

Le multiplicateur logarithmique comprend plusieurs composants cruciaux : des détecteurs de premier plan (LOD), des convertisseurs logarithmiques, un additionneur et un convertisseur anti-logarithmique. Les LOD sont chargés d'identifier le bit le plus significatif parmi les nombres binaires d'entrée. Par la suite, les convertisseurs logarithmiques génèrent les représentations logarithmiques de ces nombres binaires. Ces valeurs logarithmiques sont additionnées pour obtenir le produit, qui est ensuite décodé en un nombre binaire à l'aide du convertisseur anti-logarithmique.

3. Le multiplicateur approximatif le plus significatif proposé

Dans cette étude, nous introduisons un multiplicateur approximatif à déplacement unidirectionnel très significatif qui utilise une approche de type logarithmique. Ce nouveau multiplicateur permet d'obtenir une précision améliorée tout en maintenant des coûts matériels comparables, voire inférieurs, à ceux des multiplicateurs logarithmiques approximatifs traditionnels.

3.1. L'architecture de la conception

Les opérations fondamentales dans les réseaux de neurones (NN) impliquent des multiplications, plus précisément la multiplication des poids w par les activations x. L'architecture d'un NN utilisant le multiplicateur approximatif à déplacement unique (MSAM) le plus significatif proposé est illustrée dans la figure 1. Le MSAM comprend principalement deux composants principaux : un sous-multiplicateur approximatif (ASM) et un sous-multiplicateur exact (ESM), amélioré par des leviers de vitesses et des additionneurs auxiliaires pour une conception structurelle simple et cohérente. Plus précisément, le poids w est divisé en deux parties en fonction de la signification de ses bits : les bits les plus significatifs forment wH, traités par l'ESM, tandis que les bits les moins significatifs sont manipulés pour former w traité par l'ASM. Par la suite, le résultat de l'ESM est décalé et une opération d'addition est effectuée pour générer le résultat final r.

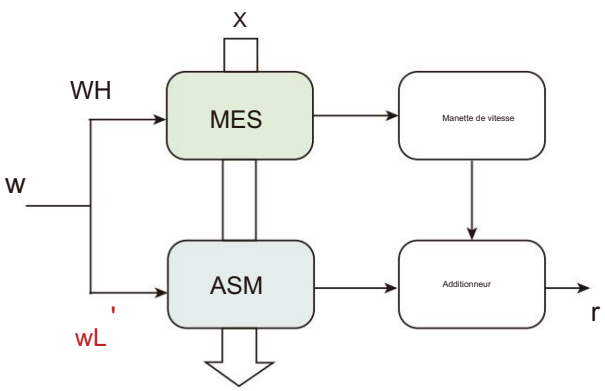


Figure 1. L'architecture de la conception de bloc de multiplicateur approximatif à déplacement unique (MSAM) la plus importante .

Un convertisseur de signe similaire à celui de [15] est utilisé pour étendre le MSAM afin de prendre en charge les nombres signés, comme illustré dans la partie gauche de la figure 2. La caractéristique interne du bloc MSAM est également présentée dans la figure 2. Nous introduisons deux paramètres essentiels facteurs qui confèrent l'attribut de configurabilité dynamique au multiplicateur, répondant à un large éventai

Machine Translated by Google

gamme d'exigences de précision qui peuvent fluctuer selon divers contextes d'application. Le premier est le facteur d'approximation, noté k, qui est utilisé pour le partitionnement du multiplicateur. Cette opération de partitionnement sépare le multiplicateur de n bits en deux segments distincts : k bits d'ordre inférieur et (n − k) bits d'ordre supérieur. Ce schéma de partitionnement décompose efficacement une opération de multiplication solitaire en deux processus multiplicatifs discrets impliquant le multiplicande et deux multiplicateurs avec des largeurs de bits plus petites. Deuxièmement, le facteur de précision, noté m, est incorporé dans la stratégie d'approximation régissant l'ASM et joue un rôle crucial en facilitant les paramètres de précision configurables dans le cadre du sous-multiplicateur.

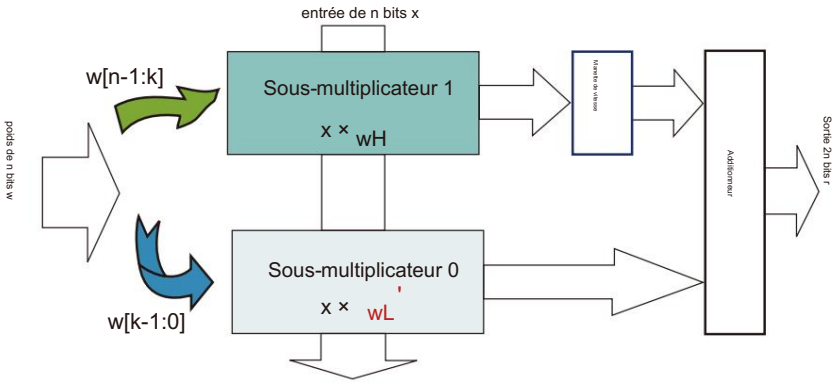


Figure 2. Extension de l'approche proposée pour prendre en charge les numéros signés, y compris la fonctionnalité interne du bloc MSAM.

3.2. Les stratégies d'approximation de poids dynamique proposées

Pour atteindre un équilibre entre l'efficacité et la précision du calcul dans la conception MSAM, nous introduisons plusieurs stratégies d'approximation de poids adaptées au composant ASM , basées sur les principes fondamentaux du multiplicateur logarithmique (LM) et du multiplicateur à coefficient constant reconfigurable (RCCM). conception. Ces stratégies visent à répondre à diverses exigences d'application et à optimiser les performances dans différentes conditions, englobant la transformation des opérations de multiplication en opérations arithmétiques plus simples telles que les décalages, l'addition ou la soustraction. Pendant ce temps, le composant ESM suit des techniques de multiplication conventionnelles et précises pour garanti Pour garantir une addition cumulative précise, la sortie générée par l'ESM subit une séquence d'opérations de décalage pour l'aligner sur la sortie de l'ASM. Cet alignement est crucial pour le processus d'addition cumulative, qui détermine en fin de compte le résultat final du bloc MSAM. En combinant ces stratégies distinctes dans les composants ASM et ESM, nous visons à optimiser les performances globales de la conception MSAM.

La valeur d'activation x sert de multiplicande, tandis que le poids w assume le rôle de multiplicateur dans l'opération de multiplication au sein d'un réseau neuronal (NN). Pour optimiser le sous-multiplicateur approximatif (ASM) pour les réseaux de neurones, nous proposons une méthode qui divise les poids du modèle en plages de données distinctes et approxime les poids au sein de ces plages sous forme de valeurs constantes. Cette collection de valeurs constantes approximatives, notée W

$'$, correspond effectivement à l'ensemble de coefficients constants C utilisé dans le cadre RCCM [12]. Une différence fondamentale est que l'ensemble W proposé nécessite la détermination d'une seule constante initiale, w tandis que les constantes restantes de l' ensemble sont déduites par rapport à cette constante initiale. De plus, cette stratégie innovante d'approximation de poids permet la sélection dynamique de valeurs constantes approximatives appropriées basées sur la valeur la plus significative (MSO) dans les données de poids d'entrée.

3.2.1. Stratégie d'approximation uni-dominante (OAS)

Le processus d'approximation d'un multiplicateur unique (w) utilisant la méthode proposée est représenté à la figure 3. La détection de premier plan (LOD) est utilisée pour détecter le plus significatif (MSO) du multiplicateur w. Une fois le MSO identifié, les (m - 1) bits suivants

Machine Translated by Google

sont mis à 1, tandis que les bits restants sont mis à 0. Si la position du MSO est au mso-ième bit (en comptant à partir de 0, où mso est l'index du bit MSO), tous les nombres compris dans la plage de w [2 mso, 2mso+1 − 1] sont approximés comme une valeur constante de un, selon l'équation (3).

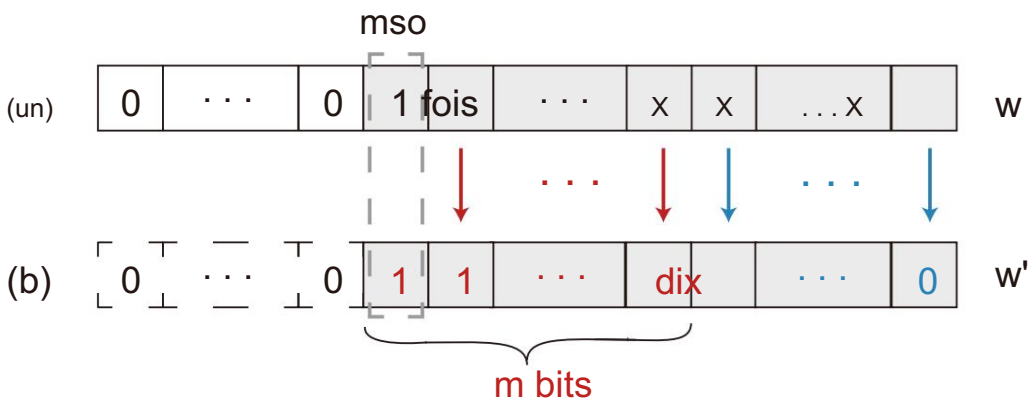


Figure 3. Exemple de processus d'approximation dominante à un multiplicateur : (a) nombre d'origine ; (b) nombre approximatif.

$$w' = \begin{cases} w_0, & mso < m \\ \sum_{je=mso-m+1}^{mso} 2^{je}, & mso \geq m. \end{cases} \quad (3)$$

La valeur de w 0 ' est déterminé par le facteur m. Par exemple, lorsque m = 1, w 0 ' est réglé sur 1b ; pendant ce temps, lorsque m = 2, w est défini ' sur 11b. Dans cette méthode d'approximation, le multiplicateur est 0 divisé dynamiquement en intervalles de plages de données distincts en fonction de la position du MSO dans les données d'entrée. Ces intervalles sont ensuite approximés à l'aide d'un ensemble de coefficients constants.

Nous appelons m le facteur de précision, car il contrôle le nombre d'intervalles d'approximation.

La sélection de m bits consécutifs à partir du MSO et leur mise à 1 repose sur deux logiques principales. Premièrement, cela permet d'établir une connexion entre ce groupe particulier de valeurs approchées et le coefficient constant approché initial w par une succession d'opérations de décalage. En conséquence, en proposant une constante approximative initiale 0 w, nous pouvons reconstituer efficacement les sorties de multiplication des coefficients restants par rapport à l' entrée x. Cette méthode rationalise considérablement la mise en œuvre du matériel et réduit la complexité. Deuxièmement, un choix judicieux de la valeur de m permet le positionnement stratégique des approximations ' 0 et en s'appuyant sur le produit de x et w ' 0 , dans chaque intervalle de poids, maximisant ainsi la précision du multiplicateur. Essentiellement, cela permet aux constantes approchées de graviter vers la valeur centrale de la plage de poids individuelle, améliorant ainsi la précision globale de l'architecture du multiplicateur.

3.2.2. Stratégie d'approximation dominante zéro (ZAS)

Dans la stratégie d'approximation à une dominante ci-dessus, tous les m bits à partir de la position MSO sont mis à 1 pour une raison importante : ce nombre approximatif de m bits devrait ressembler étroitement à la valeur moyenne de tous les nombres de k bits. Cependant, dans le cas extrême où m = k, le nombre approximé devient le plus grand, plutôt que de se rapprocher de la valeur moyenne. Pour résoudre ce dilemme, nous proposons une stratégie alternative d'approximation dominante zéro, comme illustré dans la figure 4. Immédiatement après la position du MSO, tous les bits restants ne sont pas mis à 1. Au lieu de cela, le premier bit immédiatement après la position du MSO est réglé à 0, le reste de ces bits étant réglé à 1. Cela évite efficacement le problème de nombres approximatifs trop grands tout en garantissant la proximité de la valeur moyenne. Avec un 0 agissant comme séparateur, cela permet également une application raisonnable des techniques de rejet de retenue [10], réduisant ainsi la latence et la consommation d'énergie

Machine Translated by Google

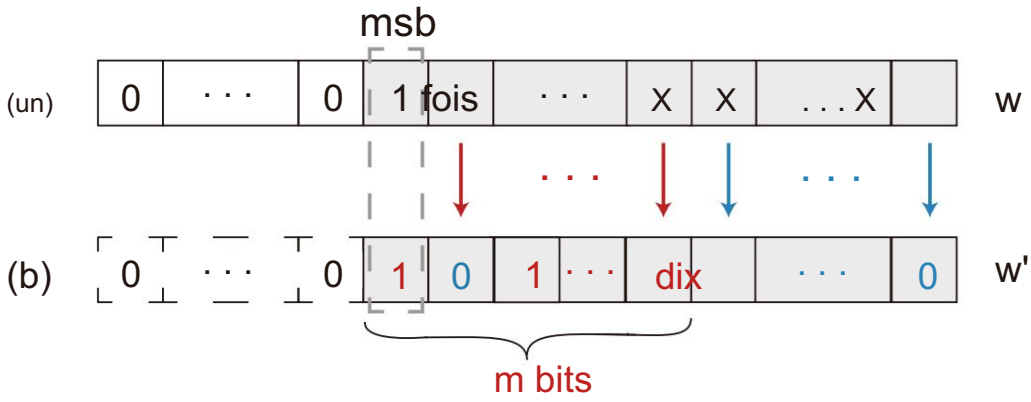


Figure 4. Exemple de processus d'approximation dominante zéro du multiplicateur : (a) nombre d'origine et (b) nombre approximatif.

3.2.3. Compensation pour la stratégie d'approximation dominante zéro

Pour mieux exploiter les avantages de l'approximation, nous ne choisissons généralement pas m = k. Empiriquement, définir m ≤ log2 (k) + 1 tend à fournir un équilibre favorable entre l'énergie avantages en termes de consommation et de précision.

Comme le montre le tableau 1, en termes de l'approche MSAM-42 (c'est-à-dire k = 4 et m = 2), le Le résultat moyen obtenu avec l'OEA est légèrement supérieur à la médiane, tandis que le résultat moyen Le résultat avec le ZAS est nettement inférieur à la médiane.

1 Tableau 1. Résultats obtenus avec MSAM-42 en utilisant diverses stratégies d'approximation.

Les k bits (Entrée w[3 : 0])	Un dominateur Approximation	Zéro dominant Approximation	Compensation pour Zéro dominant
0000	0000	0000	0000
0001 0010 0011	0011	0010	0101
0100 0101 0110 0111	0110	0100	0101
1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111	1100	1000	1010

[1] MSAM-42 indique que le facteur approximatif k est de 4 et le facteur de précision correspondant m est de 2.

Même si cela permet de mieux réduire la consommation d'énergie, cela peut également entraîner une les erreurs. Pour parvenir à un meilleur équilibre à cet égard, nous introduisons un système de compensation pour atténuer les erreurs et garantir que la précision globale n'est pas notablement compromise. Comme le montre la figure 5, étant donné que le nombre approximatif avec ZOS est probable plus petit que celui réel, en ajoutant une compensation supplémentaire de 1 après le m-bit, nous pouvons réduire efficacement la distance d'erreur tandis que la consommation d'énergie supplémentaire est essentiellement négligeable.

Machine Translated by Google

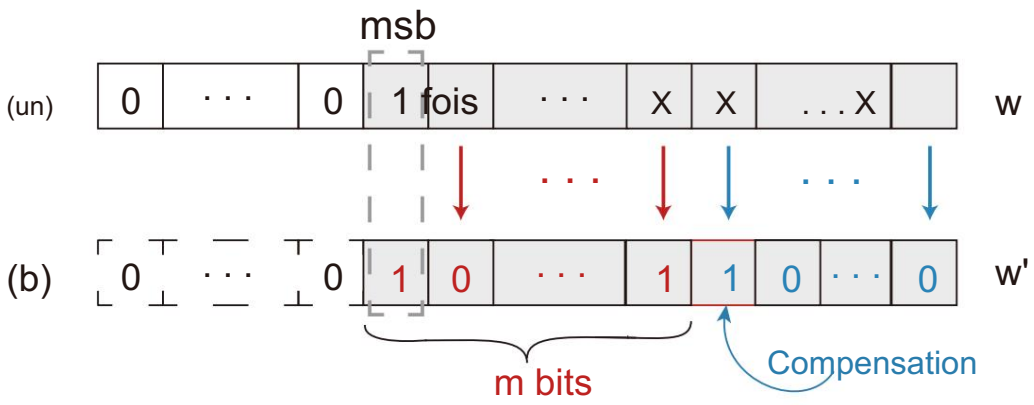


Figure 5. Exemple d'approximation dominante zéro du multiplicateur avec processus de compensation : (a) nombre d'origine et (b) nombre approché.

3.3. Mise en œuvre de la conception matérielle

Le cœur de l'excellence de la conception MSAM réside dans sa gestion attentive de l'ASM, car le raffinement de son matériel affecte directement et de manière significative la consommation énergétique globale de l'unité de multiplication.

Comme l'illustre la figure 6, le processus commence par une série d' opérations de décalage et d'addition, générant conjointement le produit du multiplicande x et la substitution spécifique conformément aux facteurs k et m. La position (pos) de la valeur w la plus élevée pour W 0 L un bit significatif dans (MUX). Ce signal régit le décalage de le poids d'entrée wL, identifiée par le détecteur de premier plan (LOD), établit le signal de commande pour le multiplexeur suivant r0tmp. Par la suite, le multiplexeur est utilisé pour générer la sortie r0 pour le module de sous-multiplicateur approximatif (ASM). Pendant ce temps, l'ESM propose une approche précise de la multiplication. Finalement, le résultat de l'ESM subit une succession d'opérations de déplacement et est ensuite fusionné avec le résultat de l'ASM, pour finalement donner le résultat final du MSAM.

Pour prendre en charge les opérations signées, l'architecture MSAM peut être augmentée en intégrant des circuits de conversion de signe avant et après les opérations non signées, comme illustré dans la figure 2. Ces circuits utilisent le complément et exécutent une opération OU avec un 1b logique dans le bit le moins significatif, servant comme approximation de la négation lorsqu'il s'agit d'entrées négatives.

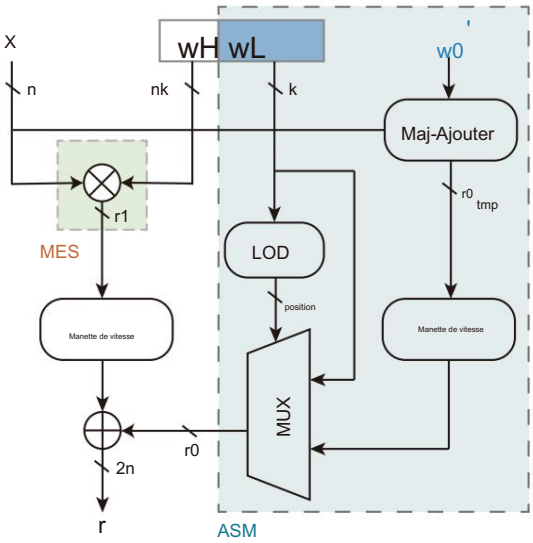


Figure 6. Mise en œuvre de la conception matérielle de MSAM.

Machine Translated by Google

4. Résultats et discussion

La conception MSAM que nous proposons est implémentée à l'aide de Verilog HDL, ainsi que d'autres multiplicateurs approximatifs avancés. Les conceptions ont été synthétisées à l'aide du Synopsys Design Compiler (DC) avec technologie CMOS 28 nm, et la simulation a été réalisée en utilisant environ 1 000 000 d'ensembles de nombres aléatoires, couvrant tout l'espace d'entrée de 8 × 8 multiplicateurs (65 536 combinaisons) à une fréquence d'horloge de 200 MHz. Le VCS L'outil a été utilisé pour la simulation, générant des fichiers d'activité de commutation rétro-annotés. pour faciliter l'analyse de puissance. La métrique NMED a été utilisée pour quantifier l'erreur de les conceptions proposées, qui sont évaluées de manière exhaustive sur l'ensemble de l'espace d'entrée en utilisant des données uniformément distribuées. Les MSAM non signés proposés ont été comparés à Mitch-w [14], DR-ALM-7 [15], DRUM6 [16] et AxRM2 [17], tandis que les MSAM signés ont été comparés à Mitch-w [14], DR-ALM-7 [15], C-SSM (m = 4) [18] et Approx-Booth [19]. Pour des comparaisons claires et pratiques, MSAM fait référence à l'utilisation de l'OSA stratégie d'approximation, MSAMZ indique l'utilisation de la stratégie d'approximation ZSA, et MSAMC désigne ZSA avec compensation supplémentaire.

Les abréviations utilisées dans ce manuscrit sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Abréviations des conceptions de multiplicateurs approximatifs.

Multiplicateur	Techniques	Description
Exact	-	Multiplicateur exact.
MSAM-km	De type logarithmique	Le multiplicateur approximatif à déplacement unique le plus significatif proposé sous différents facteurs approximatifs k et facteurs de précision m.
Mitch-w [14]	Logarithmique	Multiplicateur logarithmique approximatif non signé de Mitchell avec opérande w-bit.
Mitch-w [14]	Logarithmique	Multiplicateur logarithmique approximatif signé de Mitchell avec l'opérande w-bit.
DR-ALM-7 [15]	Logarithmique	Multiplicateur logarithmique non signé non itératif approximatif avec opérande Li -bit (Li = 7).
DR-ALM-7 [15]	Logarithmique	Multiplicateur logarithmique signé non itératif approximatif avec opérande Li -bit (Li = 7).
TAMBOUR6 [16]	Logarithmique	Multiplicateur impartial avec k(k = 6) bits dans l'opération du leader.
AxeRM2 [17]	Non logarithmique	Multiplicateurs récursifs approximatifs utilisant des éléments de base hautes performances.
C-SSM (m = 4) [18]	Non logarithmique	Multiplicateur segmenté statique approximatif avec un segment contigu de m bits (m = 4).
Approx-Booth [19]	Non logarithmique	Multiplicateur de Booth radix-4 approximatif à faible coût avec conceptions simplifiées de compresseur et d'encodeur.

4.1. Erreur d'analyse

Les accélérateurs d'apprentissage profond qui intègrent des multiplicateurs et des additionneurs approximatifs ont ont été conçus pour atténuer la consommation d'énergie et les retards, bien qu'avec un compromis acceptable en termes de précision [20]. En règle générale, un degré d'accélération plus élevé a tendance à entraîner une plus grande réduction de la précision. Les caractéristiques d'erreur d'une approximation le multiplicateur (AM) est généralement déterminé grâce à des simulations exhaustives qui englobent toutes les combinaisons d'entrée imaginables ou, alternativement, via des simulations de Monte Carlo qui utiliser des entrées aléatoires échantillonnées à partir d'une distribution prédéterminée, telle que la distribution normale ou distribution uniforme.

Considérons que M désigne la sortie du multiplicateur approximatif et M représente la sortie exacte. La distance d'erreur (ED) fournit une mesure précise de l'absolu différence entre ces deux sorties, qui est formulée comme $ED = |M - M|$. Le la distance d'erreur relative (ROUGE) exprime l'erreur en pourcentage par rapport au résultat exact. De plus, la distance d'erreur moyenne (MED) et la distance d'erreur relative moyenne (MRED) sont des mesures largement utilisées pour évaluer l'exactitude des conceptions approximatives. En outre

Machine Translated by Google

par rapport à MED et MRED, le MED normalisé (NMED) et le RED normalisé (NRED) sont des métriques stables indépendantes de la taille de la mise en œuvre, ce qui les rend utiles pour évaluer des conceptions approximatives de différentes tailles. Comme démontré dans [21], le NMED d'un multiplicateur approximatif (AM) a un impact significatif sur l'erreur de sortie d'un neurone dans un réseau neuronal, en particulier lorsqu'il s'agit d'un grand nombre d'entrées.

Pour le MSAM spécifié, avec la valeur de k restant constante et garantissant la cohérence de la largeur de bit de l'opérande pour toutes les opérations, nous utilisons MRED et NMED, comme deux métriques efficaces et largement utilisées, afin d'évaluer l'erreur introduite par l'ASM. bloc. Ces métriques constituent un moyen indispensable pour l'évaluation des erreurs inhérentes à la conception proposée, en mettant l'accent sur différentes configurations du facteur de précis La figure 7 présente les courbes MRED pour les valeurs k de 3, 4 et 5, tracées en fonction des variations du facteur de précision m, permettant l'identification de tendances distinctes au sein des courbes. Pour différentes valeurs de k, le MRED atteint son minimum lorsque m vaut 1 ou 2. Contrairement aux autres AM, dans la conception du MSAM, le facteur de précision m n'est pas nécessairement meilleur lorsqu'il est plus grand. En effet, lorsque m dépasse log2 k + 1, un nombre excessif de bits est mis à 1, entraînant un écart significatif de la valeur approchée par rapport à la valeur réelle. De plus, un m plus grand entraîne davantage de bits participant au calcul, consommant ainsi plus d'énergie. Il convient de noter que les résultats obtenus à partir de la métrique NMED correspondent étroitement à ces résultats expérimentaux. Par conséquent, lors d'analyses comparatives et d'examens détaillés ultérieurs, nous avons donné la priorité aux valeurs m de 1 ou 2. Ce choix stratégique a été fait dans le but d'atteindre un équilibre optimal dans la conception, conciliant efficacement les exigences de précision et les considérations de coûts généraux du matériel.

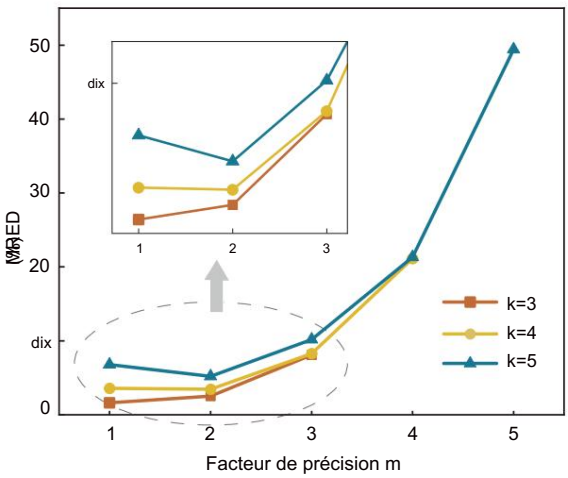


Figure 7. Courbes de distance d'erreur relative moyenne du MSAM sous différents facteurs approximatifs k et facteurs de précision m.

4.2. Résultats de synthèse et de

simulation Divers multiplicateurs MSAM-km , multiplicateurs logarithmiques existants et multiplicateurs non logarithmiques avancés ont été évalués pour évaluer leurs performances matérielles et leurs mesures de précision.

Dans notre conception de multiplicateur approximatif, un opérande est divisé en deux composants : ESM et ASM, contrôlés par le facteur d'approximation k, qui détermine le nombre de bits approchés. Le facteur de précision m représente le degré d'approximation. Le niveau d'approximation est principalement régi par k ; empiriquement, un k plus grand conduit à un degré d'approximation plus élevé, une conception plus simple et une consommation d'énergie inférieure, tandis qu'un k plus petit entraîne moins d'approximation et des économies d'énergie réduites. Le paramètre m décide de la manière dont les k bits approximatifs sont traités. Un m plus grand conserve plus de bits, mais il est important de noter que cela ne signifie pas conserver les bits précis d'origine ; à la place, il utilise m bits parmi tous les uns. Par conséquent, un m plus grand ne se traduit pas nécessairement par une plus grande précision. Statistiquement, un m plus proche de k a tendance à rendre k bits approximatifs tous à un, ce qui conduit à moins d

Machine Translated by Google

résultats expérimentaux et analyses statistiques, une valeur raisonnable pour m est de l'ordre de log2(k), rendant m plus proche de la moyenne de tous les nombres de k bits. L'introduction des paramètres k et m permet d'affiner la conception pour atteindre l'équilibre souhaité entre la précision et l'efficacité énergétique. Cependant, ces paramètres supplémentaires peuvent nécessiter une attention particulière. considération et optimisation lors de la phase de conception pour garantir des performances optimales.

Les multiplicateurs logarithmiques offrent une consommation d'énergie inférieure mais sacrifient la précision. Notre la conception atténue cela en fournissant un niveau de précision plus élevé tout en maintenant un niveau de précision plus faible. consommation d'énergie que les multiplicateurs non logarithmiques. Une comparaison du NMED et du Le produit de retard de puissance (PDP) pour les multiplicateurs 8 bits non signés est illustré à la figure 8, où le Les MSAM proposés sont mis en évidence par un carré rouge. Alors que DR-ALM-7 [15] et Mitch- w [14] présentaient un PDP plus faible, ils entraînaient un NMED plus élevé. A l'inverse, DRUM6 [16] et MSAM-21 produisait un NMED plus petit mais exigeait un PDP plus élevé. Notamment, AxRM2 [17], MSAM-52, MSAM-41 et MSAM-42 ont obtenu un PDP relativement inférieur ainsi qu'un plus petit NMED. Parmi ceux-ci, comme l'indique le cercle rouge, MSAM-41 et MSAM-42 apparaissent comme les conceptions les plus attrayantes, obtenant le compromis optimal entre PDP et NMED.

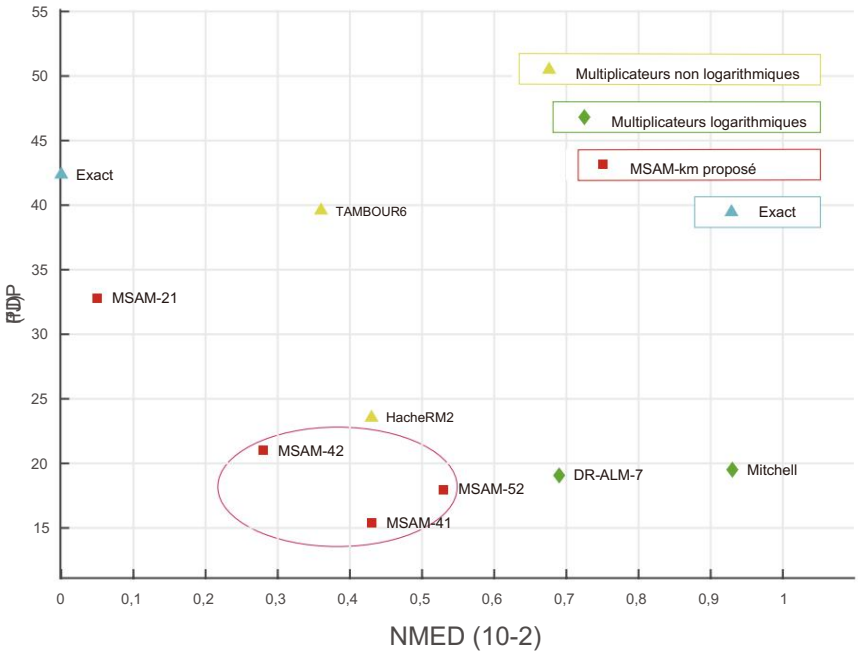


Figure 8. NMED et PDP de multiplicateurs approximatifs non signés de 8 bits.

Les résultats détaillés de cette évaluation sont résumés dans le tableau 3. Grâce à une analyse minutieuse En configurant les paramètres k et m, nous avons atteint des performances matérielles comparables à (ou, dans certains cas, dépassant) celui des multiplicateurs de Mitchell [14] et DR-ALM-7 [15] (pour exemple, avec km = 41 ou km = 52). Lorsque l'on compare MSAM-41 et MSAM-52 avec DR- ALM-7, même dans les situations où les performances du produit de retard de puissance (PDP) dépassent dans ce dernier cas, des améliorations remarquables ont encore été observées en termes de NMED, atteignant 37,68% et 23,19% respectivement. En revanche, comparé à AxRM2 [17], MSAM-41 démontre des améliorations significatives, notamment une réduction de 32,11 % de l'utilisation de la surface, une diminution du délai de 23,33% et une amélioration du PDP de 27,95%, tout en maintenant un équivalent NMED. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité matérielle impressionnante obtenue avec la conception MSAM, par rapport aux conceptions AM de pointe.

Bien que le ZAS offre une conception matérielle plus simplifiée, ce qui se traduit par une qualité supérieure En raison de la consommation d'énergie et de l'utilisation des surfaces, le NMED est augmenté par rapport à la stratégie correspondante de l'OEA. Notre conception fournit plusieurs stratégies approximatives telles que ZAS et l'OEA pour parvenir à une gamme plus dynamique de compromis, répondant ainsi aux exigences d'un gamme d'applications plus large.

Machine Translated by Google

Tableau 3. Comparaison des performances des multiplicateurs approximatifs non signés de 8 bits.

Conception	Superficie (um2)	Puissance (uW)	Retard (ns)	PDP (fJ)	NMED (10−2)
Exact	154,48	76,75	0,59	45,28	0
MSAM-21	147,29	59,55	0,59	35,13 (22 %)	0,05
MSAMZ-21	144.22	56.2	0,58	32,60 (28 %)	0,07
MSAM-32	143.01	52.3	0,52	27,20 (40 %)	0,17
MSAMZ-32	139.05	50,4	0,5	25,20 (44 %)	0,19
MSAM-31	129,53	48.39	0,52	25,16 (44 %)	0,17
MSAMZ-31	126,45	44,66	0,49	21,88 (52 %)	0,19
MSAM-42	125,5	41,78	0,52	21,73 (52 %)	0,28
MSAMZ-42	120,79	38,98	0,49	19,10 (58 %)	0,34
MSAM-41	111,89	36,86	0,46	16,96 (63 %)	0,43
MSAMZ-41	103,76	35.33	0,45	15,90 (65 %))	0,47
MSAM-52	110,75	32.36	0,52	16,83 (63%)	0,53
MSAMZ-52	104,39	31.33	0,51	15,98 (65%)	0,59
Mitchell [14]	103,45	30.01	0,65	19,51 (−57%)	0,93
DR-ALM-7 [15]	98.28	28h46	0,67	19.07 (−58%)	0,69
TAMBOUR6[16]	192,53	56.10	0,77	43,20 (−5%)	0,36
AxeRM2 [17]	164,81	39.23	0,60	23,54 (−48%)	0,43

Les designs proposés sont dans la partie ombrée.

4.3. Évaluation, simulation et analyse

4.3.1. Évaluation des performances sur les réseaux de neurones profonds

Pour une évaluation plus complète des performances du multiplicateur lorsqu'il est utilisé dans grands modèles, nous avons mené des expériences en utilisant l'ensemble de données CIFAR-10 et avons utilisé trois réseaux de neurones profonds représentatifs : VGG-19, connu pour ses couches convolutionnelles profondes ; ResNet-50, qui atténue efficacement le problème de gradient de disparition dans les réseaux profonds grâce à l'utilisation de connexions résiduelles ; et DenseNet-121, qui permet d'obtenir des fonctionnalités efficaces utilisation grâce à des mécanismes de connectivité denses. Nous avons mené des expériences en utilisant ces réseaux complexes, visant à évaluer en profondeur les performances du multiplicateur et applicabilité. De plus, nous avons étendu notre analyse expérimentale aux plus difficiles Ensemble de données ImageNet grâce à l'intégration de SqueezeNet, un système neuronal profond compact mais efficace architecture réseau conçue pour des performances optimisées sur les appareils contraints.

Afin d'évaluer les performances des multiplicateurs approximatifs, nous avons utilisé le Adapter le cadre [22] pour faciliter la simulation et l'évaluation de divers multiplicateurs dessins. Comme le montre la figure 9, les entrées sont constituées du modèle NN pré-entraîné, de la quantification configurations et le fichier de conception du multiplicateur approximatif (basé sur Verilog HDL). Initialement, le graphe de couches est construit en utilisant les paramètres de la couche convolutive et la couche de normalisation par lots adjacente. Par la suite, le dossier de conception du modèle approximatif le multiplicateur a été analysé. Sur la base des configurations de quantification, le correspondant des couches approximatives sont générées. Ces couches approximatives remplacent alors les couches du graphique de couche original. Ensuite, le graphe de couches reconstruit est traité via le Cadre AdaPT pour le recyclage et l'inférence, adhérant à la stratégie de recyclage spécifiée. Il est à noter que pour l'ensemble de données de formation, seul un sous-ensemble représentatif est requis, ce qui peut représenter environ 10 % de l'ensemble de formation d'origine, à des fins d'étalonnage. Dernièrement, des rapports de performance sont fournis, détaillant la précision et la consommation d'énergie.

Le recyclage et le réglage fin du modèle peuvent être utilisés pour atténuer la détérioration de la précision résultant de certaines approximations, telles que l'élagage et la multiplication approximative [23]. Ces approches permettent au modèle de s'adapter et de devenir plus résistant aux erreurs introduites par de telles approximations. Pendant la phase d'inférence, ces techniques permettre aux modèles AxC d'engager des coûts matériels inférieurs tout en atteignant des résultats nettement plus élevés précision. Pour évaluer efficacement la performance des multiplicateurs approximatifs, des expériences ont été réalisées sur l'ensemble de données CIFAR-10 par inférence directe sans aucun

Machine Translated by Google

reconversion. Cette méthodologie a permis une évaluation rapide de la performance des multiplicateurs. Pendant ce temps, pour l'ensemble de données ImageNet, une stratégie de recyclage plus efficace a été adoptée par en sélectionnant seulement 10 % du sous-ensemble de formation. Cette stratégie visait à réaliser un modèle réglage pendant la phase d'entraînement, permettant une amélioration de la précision et une énergie substantielle réduction pendant la phase d'inférence proprement dite. Il met en valeur l'efficacité du recyclage et réglage du modèle pour atténuer les erreurs et améliorer la précision sans l'encombrement de exigences matérielles coûteuses.

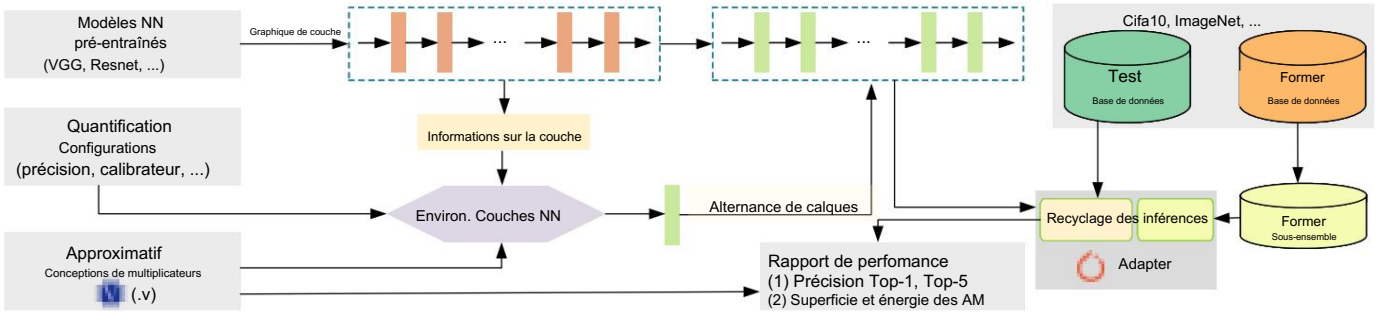


Figure 9. Flux d'évaluation basé sur le framework ADAPT.

Plusieurs versions signées du multiplicateur MSAM ont été mises en œuvre et minutieusement par rapport au multiplicateur précis de Booth radix-4, aux côtés de deux multiplicateurs logarithmiques : à savoir Mitchell [14] et DR-ALM-7 [15], ainsi que deux approximations non logarithmiques multiplicateurs - C-SSM [18] et Approx-Booth [19]. Pour garantir une comparaison équitable, nous avons reproduit les conceptions du C-SSM 8 bits (avec m = 4) et Approx-Booth (avec wG, wA = 6, 6). Le L'évaluation de ces multiplicateurs signés a strictement suivi le dispositif expérimental décrit précédemment. Les résultats de cette comparaison complète sont présentés dans le tableau 4.

Lorsque l'on considère les résultats de l'ensemble de données CIFAR-10, le MSAM se rapproche Le multiplicateur présente les meilleures performances en termes de précision et de réduction d'énergie. Plus précisément, le multiplicateur MSAM-31 a non seulement surpassé le DR-ALM-7 en termes de précision de l'évaluation du réseau, mais a également réalisé des économies d'énergie supplémentaires de 9 % par multiplicateur unique par rapport au DR-ALM-7, soulignant son efficacité. DR-ALM-7, sur le d'autre part, a démontré des performances réseau supérieures par rapport aux autres multiplicateurs approximatifs, à l'exception des variantes MSAM.

Tableau 4. Comparaison des coûts matériels et des précisions des multiplicateurs signés 8 bits sur le CIFAR10 et les ensembles de données ImageNet.

Multiplicateur	Délai de puissance de la zone NMED (10−2) (um2) (uW) (ns)		Énergie (fJ)	CIFAR10		ImageNet
				VGG-19	ResNet-50 DenseNet-121 Top-1 Top-5	
Base exacte-4	0	276,70 94,27	0,60 56,56 93,69% 0,62 32,75 (−42%)	93,57%	93,84%	57,37% 80,19%
MSAM-21 signé 0,34 MSAM-32 signé 0,40 MSAM-31 signé 0,61 MSAM-42 signé 0,60 MSAM-41 signé 1,20 Mitchell [14] 1,12 DR-ALM-7 [15]		173,88 52,82	93,66% 0,58 27,71 (−51%) 93,23% 0,55	92,81%	93,58%	54,96% 78,21%
		169,60 47,78	23,55 (−58%) 93,60% 0,60 23,83 (−58 %)	91,34%	93,30%	52,02% 76,00%
		156,11 42,82	93,08% 0,49 16,71 70%) 91,24% 0,71	93,06%	93,64%	54,01% 77,60%
		152,08 39,71	27,95 (−51%) 89,64% 0,73 28,64 (−49%)	91,71%	92,93%	50,37% 74,35%
		138,47 34,10	93,29% 0,43 35,42 (−37%) 40,24% 0,55	91,26%	91,46%	43,31% 68,00%
		132,30 39,37	40,25 (−29%) 12,29%	92,52%	91,75%	50,19% 74,20%
	0,78	127,13 39,23		92,24%	93,37%	53,92% 77,38%
C-SSM (m = 4) [18]	3,62	276,32 82,37		61,17%	73,28%	2,22% 7,47%
Environ-Stand [19]	0,17	218,23 73,18		10,65%	9,99%	17,44% 36,33%

Les trois premiers multiplicateurs approximatifs qui ont démontré la plus grande adaptabilité à l'ensemble de données ImageNet étaient MSAM-21, MSAM-31 et DR-ALM-7. Ces multiplicateurs a présenté des performances exceptionnelles sur les différentes architectures de réseau, mettant en évidence leur polyvalence et leur robustesse. Pour les applications qui privilégient une haute précision du réseau,

Machine Translated by Google

MSAM-21 s'est démarqué comme un artiste remarquable, avec une amélioration de 1,04 % de la précision du Top-1 et une amélioration de 0,83 % de la précision du Top-5, par rapport au DR-ALM-7. Ces améliorations sont significatives et peuvent avoir un impact substantiel sur les performances globales du réseau. Les résultats présentés dans le tableau 4 fournissent une comparaison complète des coûts matériels et des précisions des multiplicateurs signés 8 bits sur les ensembles de données CIFAR10 et ImageNet. Les multiplicateurs MSAM et DR-ALM-7 ont constamment démontré d'excellentes performances, les variantes MSAM se montrant particulièrement prometteuses en termes de précision et d'efficacité énergétique. Ces résultats ont des implications importantes pour la conception et l'optimisation de multiplicateurs destinés à être utilisés dans les applications d'apprentissage en profondeur.

4.3.2. Évaluation des performances de l'accélérateur de multiplication de matrice de transformateur

Les économies de ressources et d'énergie réalisées avec le multiplicateur proposé lorsqu'il est déployé dans des LLM sur des appareils de pointe ont été vérifiées. Cette vérification a été réalisée grâce à l'application du multiplicateur à un accélérateur de multiplication de matrice de transformateur, spécialement conçu pour gérer des matrices de taille 16 × 16. Lors de l'évaluation de la surcharge matérielle, avec des multiplicateurs exacts servant de base de comparaison, nous nous sommes concentrés sur l'évaluation la consommation électrique de l'accélérateur associée à la logique combinatoire. Réf. [24] souligne la possibilité d'effectuer une inférence dans des LLM avec jusqu'à 175 B de paramètres sans aucune dégradation des performances en utilisant LLM.int8(), qui permet la multiplication de plus de 99,9 % des valeurs en 8 bits. Réf. [25] démontre l'efficacité des multiplicateurs approximatifs dans le contexte des modèles de transformateur de vision. Comme le montre la figure 10, notre accélérateur de multiplication matricielle implique deux matrices entières de 8 bits, XI8 et WI8. Pour accélérer le processus de multiplication, nous avons remplacé la multiplication exacte par une méthode approchée.

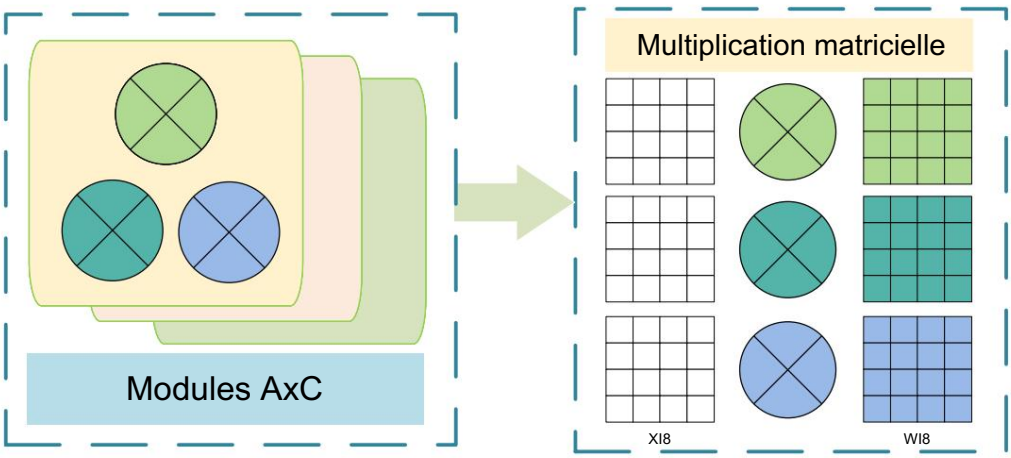


Figure 10. Accélérateur de multiplication matricielle.

Le tableau 5 présente les résultats expérimentaux du module de multiplication matricielle dans l'accélérateur Transformer, mettant en évidence la réduction effective de la surcharge matérielle obtenue avec le multiplicateur proposé. Les résultats démontrent la capacité du multiplicateur à optimiser l'utilisation des ressources et de l'énergie lors du déploiement de LLM sur des appareils de pointe. Par rapport au résultat de base obtenu à l'aide du multiplicateur exact, les MSAM présentent des réductions significatives en termes de surface, de consommation d'énergie et de latence, le MSAMZ-41 présentant les améliorations les plus prononcées. L'utilisation du calcul approximatif a démontré la possibilité d'améliorer l'efficacité des transformateurs en minimisant leur complexité de calcul et leurs besoins en mémoire [25]. Étant donné que les grands modèles nécessitent des calculs plus élevés, cela suggère que des modules plus approximatifs peuvent être inclus.
Par conséquent, nos recherches futures devraient continuer à explorer et à approfondir une intégration plus appropriée et rationnelle de ces MSAM, dans le but de réduire la consommation d'énergie tout en maintenant une précision acceptable.

Machine Translated by Google

Tableau 5. Performances matérielles de la conception proposée avec l'accélérateur de transformateur.

	Superficie (um2)	Peigne. Puissance (mW)	Retard (ns)
Référence	90 391,64	2.07	0,89
MSAM-41	67 618,91 (−25,19 %) 47	1,82 (−12,08 %)	0,79 (−11,24%)
MSAMZ-41	618,35 (−47,32 %) 51	1,46 (−29,47 %)	0,75 (−15,73%)
MSAMC-41	618,67 (−42,89 %)	1,55 (−25,12 %)	0,76 (−14,61%)

4.4. Étude de cas : accélérateur de multiplication de matrice d'images

Dans notre approche, nous effectuons une multiplication matricielle pixel par pixel entre une entrée image et une image de masque, où la valeur du pixel correspondant dans l'image de sortie est déterminé en fonction du produit obtenu. La figure 11 montre la multiplication d'images résultats, où la qualité de l'image est positivement corrélée au rapport signal/bruit maximal rapport (PSNR); en tant que tel, les valeurs PSNR des images générées sont incluses dans leur sous-titres respectifs. Les résultats obtenus avec la plupart de nos MSAM indiquent une haute qualité, démontrant un très bon PSNR par rapport au multiplicateur exact de la figure 11c.
En raison de la distribution relativement uniforme des données d'image, notre conception intégrant ESM, il présente une grande utilité et robustesse dans le contexte du traitement d'images.



(a) Image originale (b) Image du masque (c) Multiplicateur exact (100 dB) (d) MSAM-21 (57,65 dB)

(e) MSAM-32 (51,71 dB) (f) MSAM-31 (50,29 dB) (g) MSAM-42 (47,48 dB) (h) AxRM2 (47,28 dB)

(i) MSAM-52 (44,46 dB) (j) MSAM-41 (41,41 dB) (k) DR-ALM-7 (38,10 dB) (l) Mitchell (37,98 dB)

Figure 11. Les résultats de la multiplication (a) d'une image d'entrée par (b) une image de masque en utilisant le multiplicateurs.

Machine Translated by Google

4.5. Discussion sur les MSAM proposées

4.5.1. Avantages et limites Les MSAM

proposés offrent des économies d'énergie considérables tout en limitant les erreurs des multiplicateurs approximatifs grâce à l'emploi des stratégies d'approximation guidées par bits les plus significatives . Ces stratégies offrent plusieurs avantages principaux par rapport aux autres travaux.
Premièrement, les MSAM emploient les techniques d'approximation guidées par bits les plus significatives, facilitant la multiplication par décalage. Cela entraîne une diminution significative de la surface et de la consommation d'énergie, ce qui rend notre approche très efficace pour les applications de réseaux neuronaux. Deuxièmement, contrairement aux approches logarithmiques, notre approche garantit que la sortie approximative n'est pas biaisée unilatéralement. Cette fonctionnalité permet une compensation entre différentes approximations, conduisant à une précision et une fiabilité globales améliorées. De plus, un avantage clé de notre stratégie d'approximation est qu'elle se concentre sur un seul opérande dans l'opération de multiplication tout en préservant pleinement la précision de l'autre opérande. Cette approche distinctive garantit efficacement la précision, offrant une supériorité significative sur la plupart des autres travaux dans le domaine. Le contrôle précis des stratégies d'approximation et la capacité à préserver la précision dans un opérande contribuent à l'amélioration des performances dans les applications de réseaux neuronaux.

Une limitation majeure des MSAM proposés est la probabilité d'erreur relativement élevée provoquée par l'utilisation de composants prédéfinis pour remplacer des bits spécifiques. Cela rendrait nos multiplicateurs inapplicables dans les scénarios où une précision exigeante est nécessaire. Malgré cette limitation, les MSAM proposés possèdent une valeur pratique considérable, car l'ampleur des erreurs n'est pas substantielle et, étant donné que les erreurs peuvent être à la fois positives et négatives, l'erreur globale est acceptable pour les opérations par lots.

4.5.2. Travail futur

La multiplication matricielle constitue l'élément de construction fondamental dans l' architecture du transformateur [25]. À l'avenir, nous envisageons d'explorer davantage la conception de multiplicateurs approximatifs avec des erreurs concentrées et d'établir une bibliothèque de multiplicateurs approximatifs adaptée aux LLM. Les approximations au niveau logiciel, comme les réseaux de faible complexité et l'élagage, facilitent l'accélération économe en énergie des DNN [23]. Bien que les techniques d'approximation logicielle et matérielle offrent indépendamment des avantages énergétiques substantiels pour un DNN, nous avons l'intention de combiner ces techniques dans un cadre synergique dans les efforts futurs visant à maximiser les économies d'énergie. Nous espérons que cet article incitera davantage de chercheurs à mener des recherches sur cet aspect, permettant ainsi l'application des MSAM dans des scénarios plus complexes avec des budgets énergétiques serrés et des exigences de précision strictes.

5. Conclusions

Dans cette étude, nous avons proposé un multiplicateur approximatif dynamique guidé par bits le plus économe en énergie pour l'accélération du réseau neuronal. L'utilisation d'une stratégie d'approximation de poids adaptée aux NN et aux LLM a finalement abouti à un multiplicateur approximatif à haute efficacité fondé sur les principes de changement de MSO. La conception MSAM qui en résulte atteint un équilibre harmonieux entre précision et coût matériel. Lorsqu'elle est appliquée à la fois aux LLM et aux DNN, notre approche a conduit à des réductions substantielles des frais généraux de ressources matérielles. Par rapport aux multiplicateurs exacts traditionnels utilisés dans les LLM et les DNN, notre conception a permis d'obtenir une réduction remarquable de 60 % de la consommation d'énergie sans aucun impact négatif significatif sur la précision des tâches. De plus, nous avons mené une étude de cas sur la fusion d'images et les résultats démontrent que nos multiplicateurs peuvent être utilisés pour générer des images de haute qualité. Par rapport au multiplicateur exact, notre approche a très bien fonctionné lors de l'utilisation du PSNR comme mesure d'évaluati

Contributions des auteurs : Conceptualisation, PH ; Logiciel, BG; Validation, BG ; Rédaction – ébauche originale, PH ; Rédaction – révision et édition, KC ; Supervision, CW Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Machine Translated by Google

Financement : Ce travail a été soutenu par des subventions de la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (62101252 et 62134002).

Déclaration de disponibilité des données : Sur demande raisonnable, l'auteur correspondant peut fournir les données à l'appui des conclusions de cette étude.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Raiaan, MAK ; Mukta, MSH; Fatema, K. ; Fahad, Nouveau-Mexique ; Sakib, S. ; Miam, MMJ ; Ahmad, J. ; Un limon; Azam, S. Une revue des grands modèles de langage : architectures, applications, taxonomies, problèmes ouverts et défis. Accès IEEE 2024, 12, 26839-26874. [Référence croisée]
2. Rasch, MJ; Mackin, C. ; Gallo, ML; Chen, A. ; Fasoli, A. ; Odermatt, F. ; Li, N. ; Nandakumar, SR ; Narayanan, P. ; Tsai, H. ; et coll. Formation basée sur le matériel pour des charges de travail d'inférence d'apprentissage profond diverses et à grande échelle à l'aide d'accélérateurs informatiques en mémoire . Nat. Commun. 2023, 14, 5282. [Réf. croisée] [Pub Med]
3. Towhidy, A. ; Omidi, R. ; Mohammadi, K. Sur la conception de multiplicateurs itératifs approximatifs à virgule flottante. IEEETrans. Calculer. 2023, 72, 1623-1635. [Référence croisée]
4. Zhang, H. ; Ko, SB Multiplicateurs de position approximatifs efficaces pour le calcul d'apprentissage en profondeur. IEEE J. Emerg. Sel. Haut. Système de circuits. 2023, 13, 201-211. [Référence croisée]
5. Sayadi, L. ; Timarchi, S. ; Sheikh-Akbari, A. Deux multiplicateurs approximatifs non signés efficaces en développant une nouvelle configuration pour des compresseurs approximatifs 4:2. IEEETrans. Système de circuits. Je régule. Bouillie. 2023, 70, 1649-1659. [Référence croisée]
6. Schaefer, CJ; Taheri, P. ; Horéni, M. ; Joshi, S. L'impact matériel de la quantification et de l'élagage des poids dans les réseaux de neurones à pointe. IEEETrans. Système de circuits. II Mémoires Express 2023, 70, 1789-1793. [Référence croisée]
7. Pinos, M. ; Mrazek, V. ; Vaverka, F. ; Vasicek, Z. ; Sekanina, L. Techniques d'accélération pour la conception automatisée de modèles approximatifs Réseaux de neurones convolutifs. IEEE J. Emerg. Sel. Haut. Système de circuits. 2023, 13, 212-224. [Référence croisée]
8. Ahmadinejad, M. ; Moaiyeri, MH Multiplicateurs approximatifs économes en énergie et en qualité pour le réseau neuronal et l'image Traitement des demandes. IEEETrans. Émerger. Haut. Calculer. 2022, 10, 1105-1116. [Référence croisée]
9. Li, Z. ; Zheng, S. ; Zhang, J. ; Lu, Y. ; Gao, J. ; Tao, J. ; Wang, L. Conception de multiplicateur approximatif adaptable basée sur la distribution et la polarité d'entrée. IEEETrans. Intégration à très grande échelle. (VLSI) Syst. 2022, 30, 1813-1826. [Référence croisée]
10. Amirafshar, N. ; Baroughi, AS; Shahhoseini, HS; TaheriNejad, N. Carry ne tient pas compte des multiplicateurs approximatifs. IEEETrans. Circuits Système. Je régule. Bouillie. 2023, 70, 4840-4853. [Référence croisée]
11. Lotri˘c, U. ; Pilipovic, R. ; Buli´c, P. Un hybride Radix-4 et un multiplicateur logarithmique approximatif pour le traitement d'images économe en énergie. Électronique 2021, 10, 1175. [CrossRef]
12. Faraone, J. ; Kumm, M. ; Hardieck, M. ; Zipf, P. ; Liu, X. ; Boland, D. ; Leong, PH AddNet : Réseaux de neurones profonds utilisant FPGA-multiplicateurs optimisés. IEEETrans. Intégration à très grande échelle. (VLSI) Syst. 2019, 28, 115-128. [Référence croisée]
13. Gong, B. ; Chen, K. ; Huang, P. ; Wu, B. ; Liu, W. Multiplicateurs efficaces et dynamiques à déplacement unique les plus importants pour les grands modèles de langage. Dans Actes du Symposium international IEEE 2024 sur les circuits et les systèmes (ISCAS), Singapour, 19-22 mai 2024 ; p. 1 à 5.
14. Mitchell, JN Multiplication et division informatiques à l'aide de logarithmes binaires. IRE Trans. Électron. Calculer. 1962, EC-11, 512-517.
15. Yin, P. ; Wang, C. ; Waris, H. ; Liu, W. ; Han, Y. ; Lombardi, F. Conception et analyse d'une plage dynamique économe en énergie approximative multiplicateurs logarithmiques pour l'apprentissage automatique. IEEETrans. Soutenir. Calculer. 2020, 6, 612-625. [Référence croisée]
16. Hashemi, S. ; Bahar, RI; Reda, S. DRUM : Un multiplicateur impartial de plage dynamique pour des applications approximatives. Dans Actes de la Conférence internationale IEEE/ACM 2015 sur la conception assistée par ordinateur (ICCAD), Austin, Texas, États-Unis, 2-6 novembre 2015 ; pp. 418-425.
17. Waris, H. ; Wang, C. ; Xu, C. ; Liu, W. AxRMs : multiplicateurs récursifs approximatifs utilisant des éléments de base hautes performances. IEEETrans . Émerger. Haut. Calculer. 2021, 10, 1229-1235. [Référence croisée]
18. Promenade, AGA ; Naples, E. ; De Caro, D. ; Pétra, N. ; Saggese, G. ; Di Meo, G. Multiplicateurs approximatifs utilisant la segmentation statique : Analyse des erreurs et améliorations. IEEETrans. Système de circuits. Je régule. Bouillie. 2022, 69, 2449-2462. [Référence croisée]
19. Parc, G. ; Kung, J. ; Lee, Y. Conceptions simplifiées de compresseur et d'encodeur pour un multiplicateur de cabine Radix-4 approximatif à faible coût. IEEETrans. Système de circuits. II Mémoires Express 2022, 70, 1154-1158. [Référence croisée]
20. Jiang, H. ; Santiago, FJH; Mo, H. ; Liu, L. ; Han, J. Circuits arithmétiques approximatifs : une enquête, une caractérisation et des applications récentes. Proc. IEEE 2020, 108, 2108-2135. [Référence croisée]
21. Mo, H. ; Wu, Y. ; Jiang, H. ; Maman, Z. ; Lombardi, F. ; Han, J. ; Liu, L. Apprendre les caractéristiques d'erreur des multiplicateurs approximatifs pour les neurones Applications réseau. IEEETrans. Calculer. 2024, 73, 842-856. [Référence croisée]
22. Danopoulos, D. ; Zervakis, G. ; Siozios, K. ; Soudris, D. ; Henkel, J. AdaPT : Émulation rapide d'accélérateurs DNN approximatifs dans PyTorch. IEEETrans. Des. assisté par ordinateur. Intégré. Système de circuits. 2023, 42, 2074-2078. [Référence croisée]
23. Sanyal, S. ; Negi, S. ; Raghunathan, A. ; Roy, K. Calcul approximatif pour les charges de travail d'apprentissage automatique : une perspective de circuits et de systèmes . En informatique approximative ; Liu, W., Lombardi, F., éd. ; Springer International Publishing : Cham, Suisse, 2022 ; pp. 365-395.

Machine Translated by Google

24. Dettmers, T. ; Lewis, M. ; Belkada, Y. ; Zettlemoyer, L. GPT3.int8() : multiplication matricielle 8 bits pour les transformateurs à grande échelle. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, La Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 28 novembre-9 décembre 2022.
25. Danopoulos, D. ; Zervakis, G. ; Soudris, D. ; Henkel, J. TransAxx : Transformateurs efficaces avec calcul approximatif. arXiv 2024, arXiv :2402.07545.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Un circuit pilote d'éclairage électronique à un étage utilisant SiC Diodes Schottky pour alimenter une LED ultraviolette profonde Lampe de désinfection et de stérilisation

Chun-An Cheng, Chien-Hsuan Chang, Hung-Liang Cheng , En-Chih Chang*, Long-Fu Lan, Sheng-Hong Hou et Cheng-Kuan Lin

Département de génie électrique, Université I-Shou, Kaohsiung City 84001, Taiwan ; cacheng@isu.edu.tw (C.-AC); chchang@isu.edu.tw (C.-HC); hlcheng@isu.edu.tw (H.-LC); isu11001004m@cloud.isu.edu.tw (L.-FL); isu11001001m@cloud.isu.edu.tw (S.-HH) ; isu11001014m@cloud.isu.edu.tw (C.-KL)
* Correspondance : enchihchang@isu.edu.tw ; Tél. : +886-7-6577711 (poste 6642)

Résumé : Récemment, un nouveau type de source d'éclairage, la diode électroluminescente (DEL) à ultraviolet profond, est apparu sur les marchés de la purification de l'espace et de la stérilisation des surfaces. Dans cet article, un nouveau type de pilote d'éclairage électronique pour alimenter une lampe de stérilisation LED à ultraviolets profonds est proposé et développé. Le circuit principal combine un convertisseur abaisseur et un convertisseur flyback en un convertisseur de puissance AC-DC abaisseur-flyback à un seul étage et à commutateur unique avec correction du facteur de puissance. De plus, le pilote d'éclairage électronique proposé exploite une diode Schottky SiC à large bande interdite comme diode de sortie pour réduire les pertes de diode de puissance et recycle l'énergie stockée dans l'inductance de fuite du transformateur afin d'améliorer l'efficacité du circuit. L'inducteur magnétisant à l'intérieur du convertisseur de puissance AC-DC présenté est conçu pour fonctionner en mode de conduction discontinue (DCM), ce qui permet naturellement la correction du facteur de puissance (PFC). Un prototype de pilote à un étage d'une puissance nominale de 3,6 W (90 V/40 mA) a été développé et mis en œuvre pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds. Les résultats expérimentaux montrent que le facteur de puissance (PF) mesuré est supérieur à 0,9 et que la distorsion harmonique totale (THD) mesurée du courant d'entrée est inférieure à 18 % à une tension secteur d'entrée de 110 V. De plus, le facteur d'ondulation de la tension de sortie mesuré est inférieur à 1 % et le facteur d'ondulation du courant de sortie est inférieur à 4 %. De plus, le pilote d'éclairage électronique à un étage proposé pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds atteint un rendement de circuit élevé (supérieur à 90 %), un faible nombre de composants de circu

Mots-clés : circuit pilote d'éclairage électronique ; LED ultraviolettes profondes ; lampe de désinfection et de stérilisation; correction du facteur de puissance; distorsion harmonique totale

check for updates

Référence : Cheng, C.-A. ; Chang, CH-H.; Cheng, HL ; Chang, E.-C.; Lan, L.-F.; Hou, S.-H. ; Lin, C.-K. Un circuit pilote d'éclairage électronique à un étage utilisant des diodes Schottky SiC pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolettes profondes. Électronique 2024, 13, 3048. https://doi.org/10.3390/electronics13153048

Rédacteurs académiques : Yimeng Zhang, Lejia Sun et Yuming Zhang

Reçu : 24 juin 2024
Révisé : 27 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les micro-organismes tels que les bactéries, les virus, les kystes et les moisissures utilisent la germination ou la production de spores pour se reproduire. Lorsque les micro-organismes sont irradiés ou exposés à des lampes désinfectantes et stérilisantes, la lumière pénètre à travers les parois cellulaires et détruit leur ADN, modifiant ainsi leur ADN pour qu'ils deviennent inoffensifs et incapables de se reproduire, voire meurent, obtenant ainsi l'effet de désinfection et de stérilisation. Les lampes de stérilisation et de désinfection sont utilisées dans une large gamme d'applications dans une variété de secteurs, notamment les établissements de santé, l'industrie agroalimentaire, les espaces publics et les transports, les immeubles commerciaux et de bureaux, les immeubles résidentiels, l'hôtellerie, les établissements d'enseignement, les magasins de détail et les épiceries. , traitement de l'eau et agriculture. Ces diverses applications mettent en évidence la polyvalence et l'efficacité des lampes désinfectantes et stérilisantes pour promouvoir la santé et la sécurité dans différents environnements [1–4]. La source de lumière traditionnelle pour la stérilisation et la désinfection est la lampe au mercure ultraviolet (UV), qui présente les avantages d'un prix bas et d'une puissance lumineuse élevée et est couramment utilisée dans les grands endroits tels que les hôpitaux, l

Machine Translated by Google

à savoir, le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), caractérisés par une efficacité énergétique élevée et une faible consommation d'énergie, ont vu le jour. De plus, les dispositifs d'alimentation fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs à grand écart peuvent fonctionner à des tensions plus élevées, dans les restaurants et les écoles. Cependant, les inconvénients des lampes UV au mercure sont nombreux consomment plus d'énergie et ont des pertes d'énergie inférieures, tout en étant nettement inférieures au temps de préchauffage, à la durée de vie courte des lampes et que la teneur en mercure des lampes ne respecte pas dispositifs de puissance fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs en silicium. Le carbure de silicium (SiC) répond aux exigences environnementales. La lumière UV est invisible à l'œil humain et possède une longueur d'onde matériau semi-conducteur livre constitué de silicium (Si) et de carbone (C). Le SiC a une taille inférieure à 100 à 400 nanomètres. Selon la longueur d'onde, les UV peuvent être subdivisés en trois résistance de la couche de dérive que Si, ne nécessite pas de modulation de conduction, a un type d'énergie : UV-A à ondes longues (longueurs d'onde de 320 à 400 nm), UV-B à ondes moyennes (longueurs d'onde (espace environ 3 fois plus large que celui du Si et possède un champ de rupture d'isolation de 280 à 320 nm) et des UV-C à ondes courtes (longueurs d'onde de 100 à 280 nm). UV-C à ondes courtes, environ 10 fois supérieure à celle du Si. Par rapport aux diodes Si-PN haute tension, également appelées ultraviolets profonds, elle possède des propriétés désinfectantes et germicides. diodes Si-Fast Recovery à grande vitesse, diodes SiC Schottky en semi-conducteurs à large espacement. L'utilisation d'UV-C ultraviolets à ondes courtes ou de lumière ultraviolette profonde détruit l'ADN ou Les matériaux tor ont d'excellentes caractéristiques à haute vitesse et haute tension. Puisque la structure moléculaire de l'ARN inverse des cellules microbiennes, empêchant ainsi la croissance ou la régénération cellulaire, Le temps de récupération des diodes SiC Schottky est extrêmement court, l'énergie perdue lors de l'inversion et permettant finalement d'obtenir l'effet de désinfection et de stérilisation. Les LED UV profondes sont la récupération peut être considérablement réduite, ce qui convient aux applications à commutation élevée caractérisées par la protection de l'environnement et les économies d'énergie, une longue durée de vie, aucun temps de préchauffage, fréquence, et est propice à la miniaturisation du circuit global ainsi qu'à l'im- no mercure et à la miniaturisation de la source lumineuse. Les lampes UV au mercure traditionnelles ont preuve de la densité de puissance [21,22]. Notes complémentaires sur la fiabilité à long terme et progressivement remplacées par des LED UV profondes, qui sont devenues une nouvelle source de lumière pour dégradation potentielle des diodes Schottky en carbure de silicium dans les marchés de purification thermique et électrique des espaces et de stérilisation de surfaces tels que les maisons, les écoles, les hôpitaux, les bureaux les contraintes sont données ci-dessous. Selon la littérature [21], les diodes Schottky en carbure de silicium sont utilisées dans les bâtiments, les supermarchés ou les grands magasins. De plus, une désinfection ultraviolette profonde n'ont pas d'injection de porteurs minoritaires et leur temps de récupération n'augmente pas avec le temps et les lampes de stérilisation peuvent facilement tuer les bactéries, mais en raison du faible pouvoir de pénétration des profondeurs température par rapport aux diodes au silicium conventionnelles. De plus, les diodes SiC Schottky sont des lampes de désinfection et de stérilisation aux ultraviolets, elles peuvent être affectées par les particules de poussière , si la Les appareils à porteurs majoritaires et par conséquent le courant inverse est plus petit et la température dans les cellules endommagées par la désinfection aux ultraviolets profonds et les lampes de stérilisation n'est pas complètement dépendant. De plus, par rapport aux diodes au silicium, les diodes SiC Schottky sont détruites , les cellules peuvent toujours être réparées et revitalisées. Il est donc important de l'avantage d'une récupération plus rapide, ce qui réduit les pertes de commutation et le bruit, et l'avant plus bas fournit la distance appropriée et un temps et une intensité d'irradiation suffisants des profondeurs tension, ce qui réduit les pertes de conduction. Par ailleurs, la littérature [22] mentionne l'utilisation d' une lampe de désinfection et de stérilisation ultraviolette sur les objets désinfectés afin d'obtenir un bon effet de stérilisation [3–8].

De plus, dans les diodes au silicium, si dI/dt est grand, un schéma de courant de récupération accru fiabilité à long terme des diodes SiC Schottky en ce qui concerne les défaillances dV/dt et dI/dt.

La figure 1 montre la topologie de circuit à deux étages d'un pilote d'éclairage électronique existant. (Irr) se produit ce qui peut endommager l'appareil en raison de la concentration de courant. En revanche pour la fourniture de lampes de stérilisation et de désinfection à LED ultraviolettes profondes. La première étape est étant donné que le point de rétablissement du SiC Schottky est très faible (Irr), et le deuxième étage est un convertisseur de puissance CA-CC avec correction du facteur de puissance (PFC), et le deuxième étage est un convertisseur DC-DC et fournit la puissance DC requise pour la stérilisation LED UV profonde Convertisseur DC-DC. Ce type de [8] Circuits pilotes d'éclairage électronique à deux étages pour la désinfection et la stérilisation profonde Les lampes à ultraviolets (LED) UV-C sont proposées et développées dans ce pa- per, qui est une extension et une amélioration de la littérature [20]. Le circuit principal et les étages arrière, rendant les composants du convertisseur abaisseur-élévateur moins contraignants et les composants de commutation plus faciles à piloter. Afin de réduire le nombre d'interrupteurs de puissance et de composants de circuit, le pilote recycle l'énergie stockée dans l'inductance de fuite du transformateur et exploite des circuits qui intègrent un flyback à un seul étage avec deux étages du circuit. [9–20] a développé un certain nombre de pilotes de LED à un seul étage et à un seul interrupteur convertisseur de puissance AC-DC et un convertisseur de puissance DC-DC approprié. une diode Schottky en carbure de silicium à large bande interdite comme diode de sortie pour améliorer le circuit efficacité.

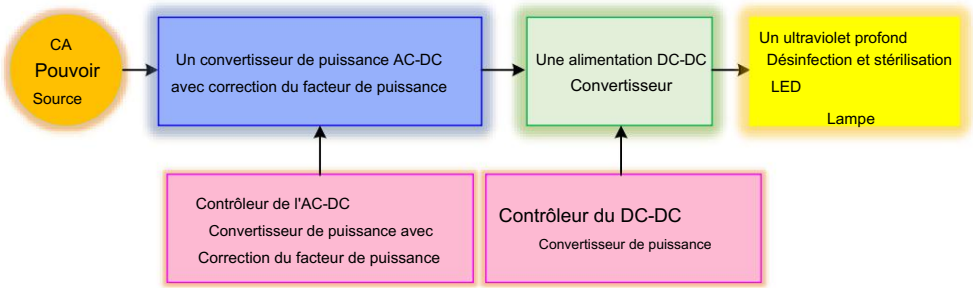


Figure 1. Schéma fonctionnel du pilote d'éclairage électronique à deux étages existant pour fournir une source profonde lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds [8].

Figure 1. Schéma fonctionnel du pilote d'éclairage électronique à deux étages existant pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette [8].

Alors que les problèmes environnementaux liés au réchauffement climatique et aux émissions de carbone ont Cet article est organisé et présenté comme suit. La section 2 décrit et analyse de plus en plus sérieusement ces dernières années, les êtres humains ont pris des mesures d'économie d'énergie. le mode de fonctionnement d'un circuit pilote d'éclairage électronique à un étage utilisant une réduction de carbone SiC et l'amour de la terre comme direction principale commune du développement. Diode Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds. Ainsi, les combustibles fossiles doivent être progressivement réduits et rapidement introduits dans l'énergie verte. fournit des directives de conception pour certains paramètres de circuit. La section 3 présente les applications expérimentales et d'économie d'énergie et, par conséquent, une efficacité énergétique élevée et une faible consommation d'énergie. Les résultats d'un prototype de circuit pilote d'éclairage électronique utilisant une diode SiC Schottky pour la consommation sont également progressivement adoptés comme objectif dans les produits de la vie quotidienne. Dans le Paris Accord de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques, il est déclaré que le

Machine Translated by Google

Le taux de réchauffement climatique doit être maintenu à moins de 2 ◦C. Sur la base de la tendance actuelle du développement économique , même si le réchauffement est maintenu à moins de 2 ◦C en 2050, les émissions de CO2 augmenteront encore de 21 % et il faudra produire jusqu'à 50 % d'électricité en plus pour faire face et subvenir aux besoins humains. activités. Il est donc de plus en plus important de moderniser et d'améliorer considérablement les sources d'énergie existantes. La matière première la plus importante pour les semi-conducteurs est la production de tranches de silicium (Si) de première génération. Cependant, les propriétés physiques de ce matériau ont atteint leurs limites dans les produits existants à base de Si et il n'est plus possible d'augmenter la puissance, de réduire les pertes thermiques et d'augmenter la vitesse. En conséquence, il est nécessaire d'évoluer vers d'autres matériaux capables de mieux exploiter l'efficacité du transfert d'électrons et la faible consommation d'énergie. C'est dans ce contexte que sont nés les semi-conducteurs à large bande interdite de troisième génération, qui font actuellement l'objet de vifs débats sur le marché. , à savoir le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), qui se caractérisent par une efficacité énergétique élevée et une faible consommation d'énergie, ont vu le jour. De plus, les dispositifs de puissance constitués de matériaux semi-conducteurs à grand écart peuvent fonctionner à des tensions plus élevées, générer plus de puissance et avoir des pertes d'énergie inférieures, tout en étant nettement plus petits que les dispositifs de puissance constitués de matériaux semi-conducteurs en silicium. Le carbure de silicium (SiC) est un matériau semi-conducteur composé de silicium (Si) et de carbone (C). Le SiC a une résistance de couche de dérive inférieure à celle du Si, ne nécessite pas de modulation de conduction, possède un espace énergétique environ 3 fois plus large que celui du Si et possède une intensité de champ de rupture d'isolation environ 10 fois supérieure à celle du Si. Comparées aux diodes Si-PN haute tension et aux diodes Si-Fast Recovery haute vitesse, les diodes SiC Schottky fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs à grand écart présentent d'excellentes caractéristiques haute vitesse et haute tension. Étant donné que le temps de récupération inverse des diodes SiC Schottky est extrêmement court, l'énergie perdue lors de la récupération inverse peut être considérablement réduite, ce qui convient aux applications à fréquence de commutation élevée et favorise la miniaturisation du circuit global ainsi que l'amélioration de densité de
Des notes supplémentaires sur la fiabilité à long terme et la dégradation potentielle des diodes Schottky au carbure de silicium sous des contraintes thermiques et électriques sont données ci-dessous. Selon la littérature [21], les diodes Schottky en carbure de silicium n'ont pas d'injection de porteurs minoritaires et leur temps de récupération n'augmente pas avec la température par rapport aux diodes silicium conventionnelles. De plus, les diodes SiC Schottky sont des dispositifs à porteurs majoritaires et le courant inverse est donc plus faible et indépendant de la température. De plus, par rapport aux diodes au silicium, les diodes SiC Schottky présentent l'avantage d'une récupération plus rapide, ce qui réduit les pertes de commutation et le bruit, et d'une tension directe plus faible, ce qui réduit les pertes de conduction. De plus, la littérature [22] mentionne la fiabilité à long terme des diodes Schottky SiC en ce qui concerne les défaillances dV/dt et dI/dt. De plus, dans les diodes au silicium, si dI/dt est élevé, un courant de récupération accru (Irr) se produit, ce qui peut endommager le dispositif en raison de la concentration de courant. En revanche, étant donné que le courant de récupération dans les diodes SiC Schottky est très faible, on peut supposer qu'il est peu probable qu'un tel phénomène se produise.

Pour résoudre les problèmes ci-dessus, un nouveau pilote d'éclairage électronique pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolettes profondes est proposé et développé dans cet article, qui est une extension et une amélioration supplémentaire de la littérature [20]. Le circuit principal combine un convertisseur abaisseur et un convertisseur flyback en un convertisseur de puissance AC-DC abaisseur-flyback à un seul étage et à commutateur unique avec mise en forme du courant d'entrée. De plus, le pilote proposé recycle l'énergie stockée dans l'inductance de fuite du transformateur et exploite une diode Schottky au carbure de silicium à large bande interdite comme diode de sortie pour améliorer l' efficacité du circuit.

Cet article est organisé et présenté comme suit. La section 2 décrit et analyse le mode de fonctionnement d'un circuit pilote d'éclairage électronique à un étage utilisant une diode Schottky SiC pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds, et fournit des lignes directrices de conception pour certains paramètres du circuit. La section 3 montre les résultats expérimentaux d'un prototype de circuit pilote d'éclairage électronique utilisant une diode Schottky SiC pour alimenter une lampe de stérilisation et de désinfection à LED ultraviolette profonde. Enfin, quelques conclusions sont données dans la section 4.

Machine Translated by Google

fournir une lampe de stérilisation et de désinfection à LED ultraviolette profonde. Enfin, quelques conclusions sont données dans la section 4.

2. Descriptions et analyse des modes de fonctionnement dans le système à un étage proposé

Circuit pilote d'éclairage électronique utilisant des diodes Schottky SiC pour alimenter un circuit pilote d'éclairage électronique utilisant des diodes Schottky SiC pour alimenter une source profonde

Lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde

Le pilote d'éclairage électronique avec PFC pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds développé dans cet article est illustré à la figure 2, quelle lampe d'in- tion et de stérilisation a été développée. dans cet article est illustré à la figure 2, qui intègre un transforme un convertisseur abaisseur et un convertisseur flyback en un convertisseur convergisseur de puissance AC-DC à un étage et un convertisseur flyback en une conversion de puissance AC-DC à un étage et (incluant une inductance de filtre LF, un condensateur de filtre CF, un redresseur en pont complet (incluant D1, D2, D3 sion et comprend une inductance de filtre LF, un condensateur de filtre CF, un redresseur en pont complet (incluant a et D4), un interrupteur de puissance SB, deux diodes DB et DF, un transformateur TR avec un aimant D1, D2, D3 et D4), un interrupteur de puissance SB, deux diodes DB et DF, un transformateur TR avec une inductance magnétisante LM et une inductance de fuite Llk, deux condensateurs de sortie CO1 et CO2, et le profond une inductance magnétisante LM et une inductance de fuite Llk, deux condensateurs de sortie CO1 et CO2, et le stérilisation à LED ultraviolet. En concevant l'inducteur magnétisant. En concevant la lampe de désinfection et de profond stérilisation à LED ultraviolet. En concevant l'inducteur magnétisant. En concevant la lampe de désinfection et de l'inductance de compensation LM dans le circuit de commande d'éclairage électronique proposé pour fonctionner en conduction discontinue décrochage. LM dans le circuit de commande d'éclairage électronique proposé pour fonctionner en conduction discontinue mode (DCM), le PFC peut être réalisé naturellement. De plus, l'énergie stockée dans la fuite Mode (DCM), le PFC peut être réalisé naturellement. De plus, l'énergie stockée dans la fuite l'inductance de fuite Llk du transformateur TR dans la topologie proposée Llk du transformateur TR dans la topologie proposée peut être récupérée et l'efficacité du circuit peut être améliorée en exploitant une diode Schottky SiC à large bande interdite être récupérée et l'efficacité du circuit peut être améliorée en exploitant une diode Schottky SiC à large bande interdite comme diode de sortie. comme diode de sortie.

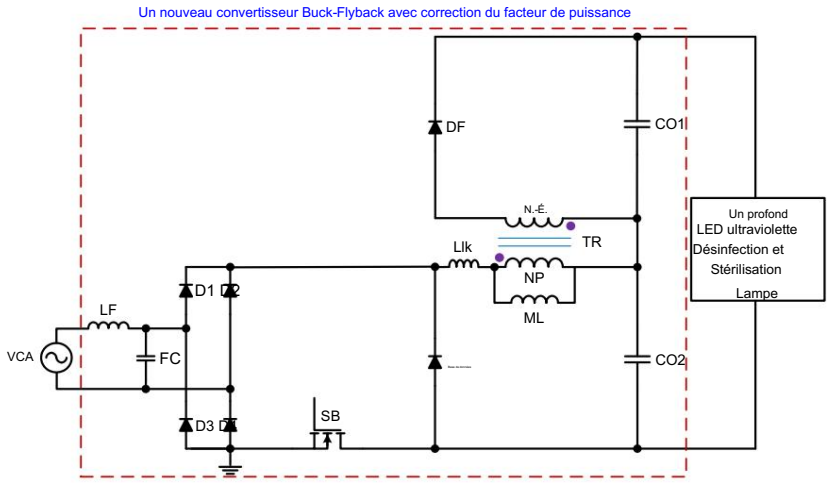


Figure 2. Le pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des didons SiC Schottky pour la sup- Figure 2. Le pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des didons SiC Schottky pour utilisant une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde. fournissant une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde.

La figure 3 est le schéma équivalent du circuit de commande d'éclairage électronique à un étage. Schottky pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation LED ultraviolette profonde développée dans cet article avec la fonction de correction du facteur de puissance. Théorique. La lampe de théorisation développée dans cet article avec la d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant du SiC Schottky. Formes d'onde du pilote Des didons Schottky pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolet profond représentés. Sont illustrés à la figure 4. Les circuits pilotes d'éclairage électronique à un étage proposé pour la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde, des hypothèses sont faites lors de l'analyse des opérations du mode de fonctionnement dans la présentation présentée comme suit : circuit pilote et sont représentés comme suit :

(a) La source de tension équivalente à la tension du secteur d'entrée après son passage le circuit redresseur double alternance est désignée par VREC. Puisque la fréquence de commutation fs est beaucoup plus grande que la fréquence de ligne fAC, la tension redressée VREC peut être considérée comme constante pendant un cycle de commutation dans l'analyse du mode circuit.

(b) L'inductance de fuite Llk du transformateur TR est prise en compte.

(c) L'inductance magnétisante LM du transformateur TR est conçue pour fonctionner en mode de conduction discontinu (DCM).

(d) Négliger les chutes de tension de conduction et leurs résistances équivalentes de toutes les diodes.

(e) Les composants restants du circuit sont considérés comme des composants idéaux.

Machine Translated by Google

(d) Négliger les chutes de tension de conduction et leurs résistances équivalentes de tous les di- (d) Négliger les chutes de tension de conduction et leurs résistances équivalentes de tous les di-odes.

(e) Les composants restants du circuit sont considérés comme des composants idéaux. (e) Les composants restants du circuit sont considérés comme des composants idéaux.

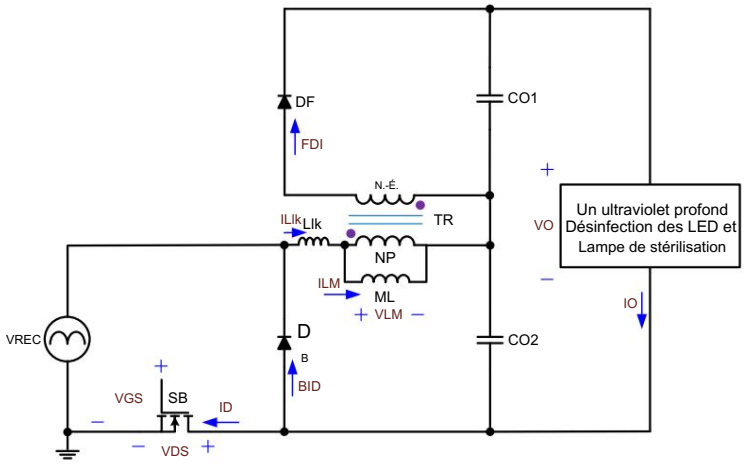


Figure 3. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique proposé utilisant SiC Schottky Figure 3. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique proposé utilisant des diodes SiC Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolet profond tout en analysant les modes opérationnels.

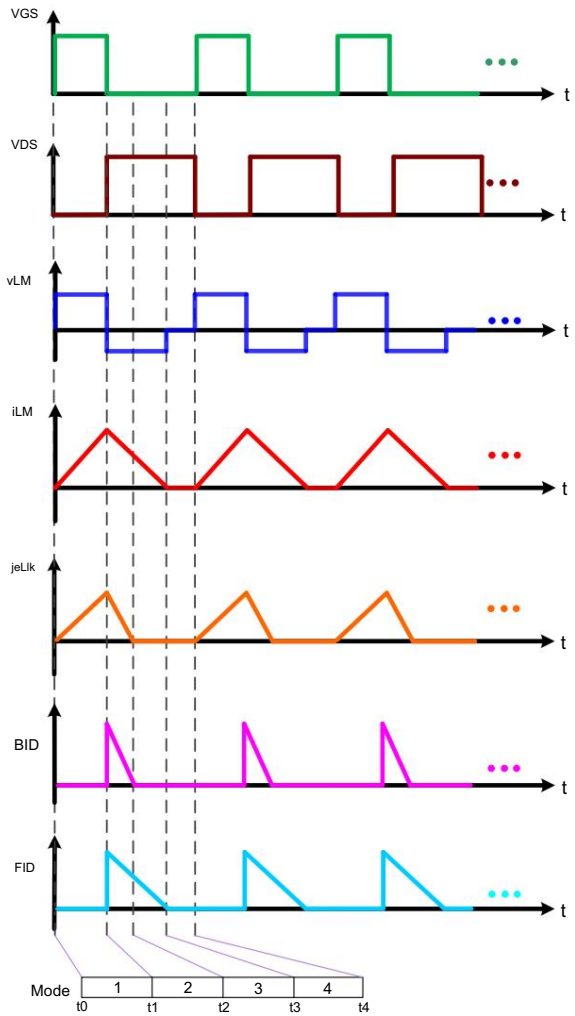


Figure 4. Formes d'onde théoriques du pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant SiC Figure 4. Formes d'onde théoriques du pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des diodes SiC Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde.

Mode de fonctionnement 1 (t0 ≤ t < t1) : La figure 5 montre le circuit équivalent du système proposé Circuit pilote d'éclairage électronique à un étage pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds pendant le mode 1. L'interrupteur d'alimentation SB est activé et le

Machine Translated by Google

Mode de fonctionnement 1 (t0 ≤ t < t1) : La figure 5 montre le circuit équivalent du système proposé

Circuit pilote d'éclairage électronique à un étage pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation LED à ultraviolets profonds pendant le mode 1. L'interrupteur d'alimentation SB est allumé et la source de tension équivalente

une source de tension équivalente VREC est connectée aux deux extrémités de la diode DB, faisant de

VRECC est connectée aux deux extrémités de la diode DB, ce qui rend la diode

DB un conducteur polarisé en direct. La source de tension équivalente VREC fournit de

DB non conducteur polarisé en inverse. La source de tension équivalente VREC fournit

l'énergie au condensateur de sortie CO2 et à l'inductance magnétisante LM du transformateur TR

énergie au condensateur de sortie CO2 et à l'inductance magnétisante LM du transformateur TR

ainsi que l'inductance de fuite à travers l'interrupteur SB, ce qui entraîne une augmentation linéaire du

ainsi que l'inductance de fuite à travers l'interrupteur SB, ce qui entraîne une augmentation linéaire de

le courant de l'inducteur de magnétisation LM et la polarité de la tension des deux côtés de l'

courant de l'inductance magnétisante LM et la polarité de la tension des deux côtés du

l'inducteur de magnétisation LM et l'inducteur de fuite Llk sont positifs à gauche et négatifs à droite.

inducteur de magnétisation LM et de l'inducteur de fuite Llk sont positifs à gauche et négatifs à droite.

Les condensateurs de sortie CO1 et CO2 fournissent de l'énergie à la lampe de désinfection et de

stérilisation des LED à ultraviolets profonds. Lorsque l'interrupteur SB s'éteint, le courant de la

et lampe de stérilisation. Lorsque l'interrupteur SB s'éteint, le courant de l'inducteur magnétisant LM

magnétisation

le conducteur LM atteint sa valeur maximale et le mode se termine.

atteint sa valeur maximale et le mode se termine.

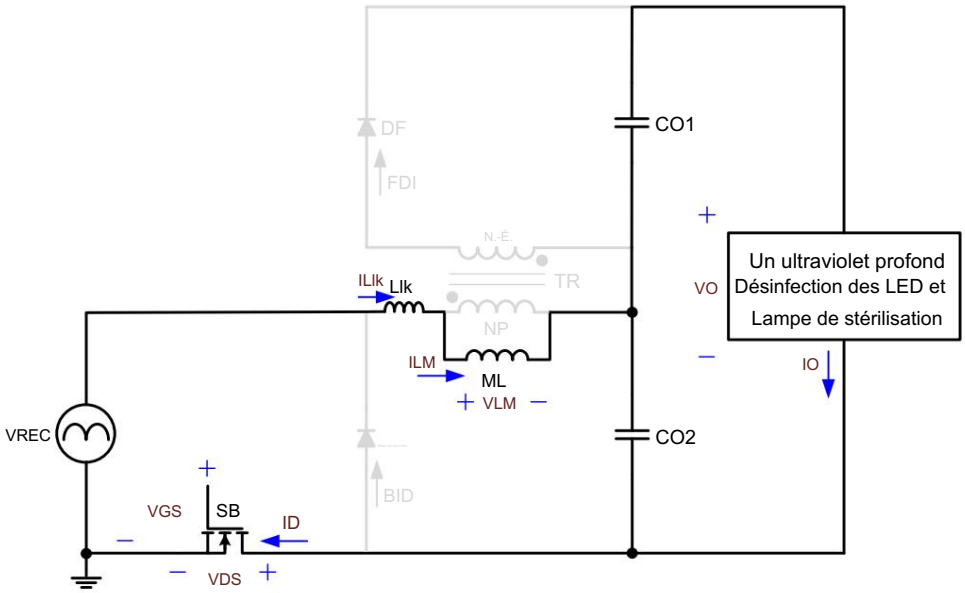


Figure 5. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant

Figure 5. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des diodes SiC

Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation LED à ultraviolets profonds pendant le

Mode 1.

Mode opérationnel 2 (t1 ≤ t < t2) : La figure 6 montre le circuit équivalent du système proposé.

Mode opérationnel 2 (t1 ≤ t < t2) : La figure 6 montre le circuit équivalent du système proposé.

Circuit de commande d'éclairage électronique à un étage pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation des LED

à ultraviolets profonds. Circuit de commande d'éclairage électronique à un étage pour fournir une lampe de désinfection et

de stérilisation des LED à ultraviolets profonds pendant le mode 2. Lorsque l'interrupteur d'alimentation SB s'éteint, la tension

Lampe de fection et de stérilisation pendant le mode 2. Lorsque l'interrupteur d'alimentation SB

La polarité de tension de l'inducteur magnétisant LM et de l'inducteur de fuite Llk est modifiée en positive

c'éteint, la polarité de l'inducteur magnétisant LM et de l'inducteur de fuite Llk est modifiée vers la droite.

et laissée négative selon la loi de Lenz, ce qui fait que la diode DB est la

positif à droite et négatif à gauche selon la loi de Lenz, qui met la diode DB en état de polarisation directe.

être l'état actif de biais direct. Le courant de l'inducteur magnétisant LM circule dans l'

Le courant de l'inducteur magnétisant LM circule dans la position

endroit où l'enroulement côté primaire NP du transformateur TR n'a pas d'extrémité de point, et

où l'enroulement côté primaire NP du transformateur TR n'a pas de point, la polarité de tension

des deux extrémités de l'enroulement NP est positive à droite et négative à gauche.

extrémité, et la polarité de tension des deux extrémités de l'enroulement NP est droite-positive et gauche.

Par conséquent, la polarité de la tension réfléchie aux deux extrémités de l'enroulement côté secondaire

négatif. Par conséquent, la polarité de la tension réfléchie aux deux extrémités du secondaire NS est positive à gauche et

négative à droite, ce qui fait que la diode DF fonctionne dans le sens direct

l'enroulement latéral NS est positif à gauche et négatif à droite, ce qui fait fonctionner la diode DF en état

de conduction. A ce moment, l'inducteur magnétisant LM et l'inducteur de fuite Llk

état de conduction biaisé vers l'avant. A ce moment, l'inducteur magnétisant LM et la fuite sont dans un

L'inducteur d'âge Llk est dans un état de libération d'énergie, provoquant une diminution linéaire du

état de libération d'énergie, provoquant l' augmentation du courant de l'inducteur magnétisant LM,

l'inducteur LM diminue linéairement. Puisque la diode DB est en conduction polarisée en direct de

courant de magnétisation. Puisque la diode DB est dans l'état de conduction polarisée en direct, l'énergie

l'inducteur magnétisant LM et que l'inducteur de fuite Llk est fourni à la sortie

Dans cet état, l'énergie de l'inducteur magnétisant LM et de l'inducteur de fuite Llk est fournie au condensateur CO2 à travers

la diode DB, et le courant de l'inducteur magnétisant LM indique

au condensateur de sortie CO2 à travers la diode DB, et le courant de magnétisation en- une diminution

linéaire. En raison de la conduction polarisée en direct de la diode DF, l'énergie de

Le conducteur LM présente une diminution linéaire. En raison de la conduction polarisée en direct de

la diode DF, l'inductance magnétisante LM est alimentée via le transformateur TR et la diode DF pour

l'énergie de l'inducteur magnétisant LM est fournie via le transformateur TR et les capacités de sortie

CO1 et CO2 ainsi qu'à la désinfection LED ultraviolette profonde

diode DF aux capacités de sortie CO1 et CO2 ainsi qu'à la LED ultraviolette profonde et à la lampe de

stérilisation, De plus, les condensateurs de sortie CO1 et CO2 continuent de fournir

lampe de désinfection et de stérilisation. De plus, les condensateurs de sortie CO1 et CO2 continuent

d'alimenter la lampe de désinfection et de stérilisation LED à ultraviolets profonds. Le mode se termine

lorsque l'inducteur de fuite Llk finit de libérer de l'énergie et le courant ILlk de la fuite

l'inductance Llk tombe linéairement jusqu'à zéro.

Machine Translated by Google

pour fournir de l'énergie à la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde. Le pour fournir
de l'énergie à la lampe de désinfection et de stérilisation LED à ultraviolets profonds. Le mode se termine lorsque
l'inducteur de fuite Llk finit de libérer de l'énergie et le courant Llk de l'inducteur de fuite Llk chute linéairement jusqu'à zéro.
Llk finit de libérer de l'énergie et le courant Llk de l'inducteur de fuite Llk chute linéairement jusqu'à zéro.
l'inductance de fuite Llk chute linéairement jusqu'à zéro.

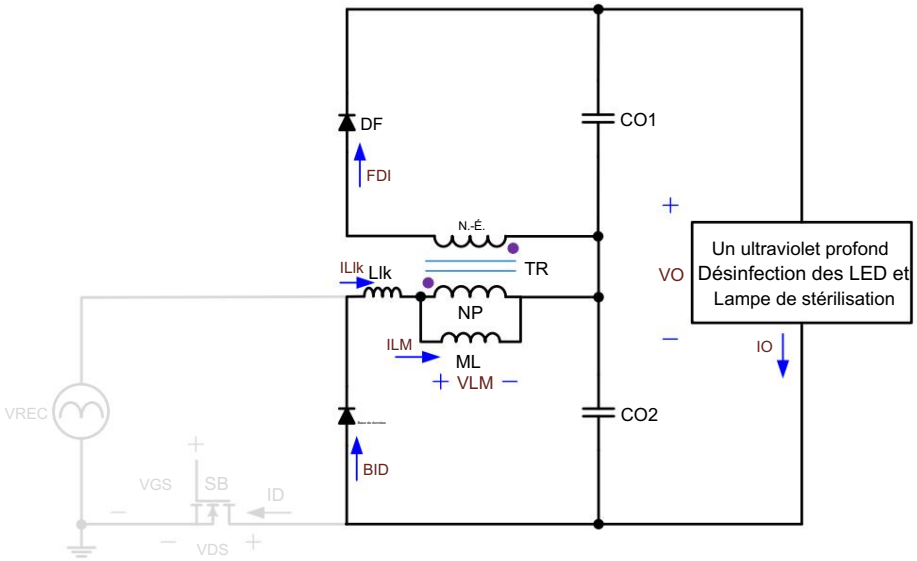


Figure 6. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant
Figure 6. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des diodes SiC
Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolet profond pendant le
Mode 2.

Mode opérationnel 3 (t2 ≤ t < t3) : La figure 7 montre le circuit équivalent du système proposé.
Mode opérationnel 3 (t2 ≤ t < t3) : La figure 7 montre le circuit équivalent du système proposé.
Lampe de fection et de stérilisation pendant le mode 3. L'énergie de l'inducteur magnétisant LM
est alimentée en continu par le transformateur TR et la diode DF aux condensateurs de sortie CO1 et CO2 et à la
lampe de désinfection et de stérilisation LED à ultraviolets profonds. aux
de stérilisation à LED ultraviolette profonde. Ce mode se termine lorsque la magnétisation
désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette magnétisante. Ce mode se termine lorsque
fini de libérer de l'énergie et le courant de l'inducteur magnétisant ILM chute linéairement jusqu'à zéro.
linéairement vers zéro.

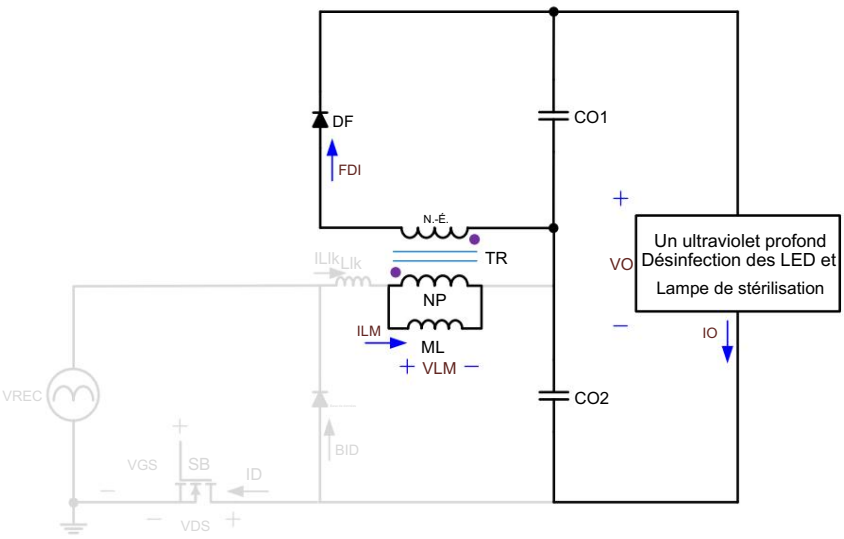
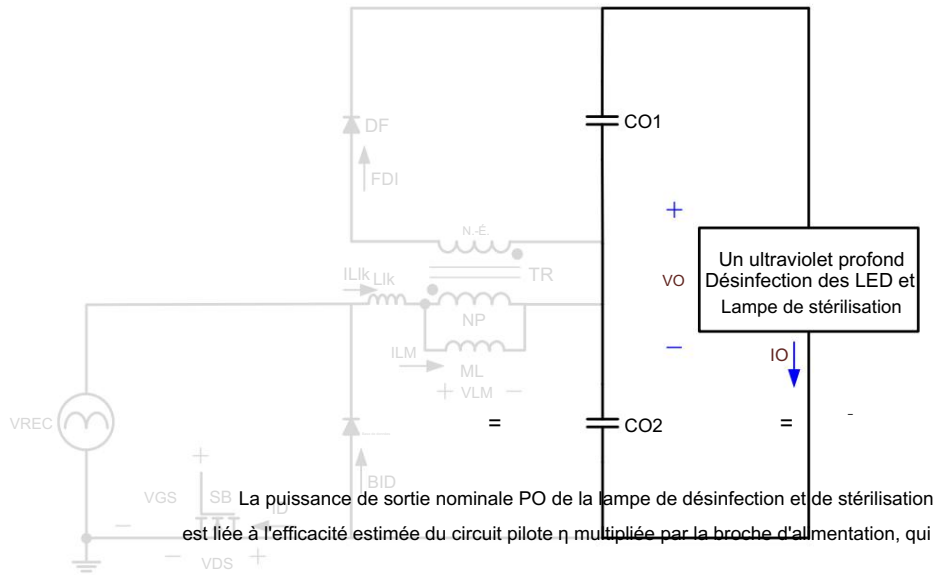


Figure 7. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant
Figure 7. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des diodes SiC Schottky pour
alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds pendant le
Mode 3.

Mode opérationnel 4 (t3 ≤ t < t4) : La figure 8 montre le circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé pour alimenter une LED ultraviolette profonde.
lampe de désinfection et de stérilisation pendant le mode 4. Les condensateurs de sortie CO1 et CO2

Machine Translated by Google

Mode opérationnel 4 (t3 ≤ t < t4) : La figure 8 montre le circuit équivalent du système proposé.
Circuit pilote d'éclairage électronique à un étage pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds pendant le mode 4. Les condensateurs de sortie CO1 et CO2 fournissent continuellement de l'énergie à la désinfection et à la stérilisation des LED à ultraviolets profonds
Fournissez efficacement de l'énergie à la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde. lampe. Lorsque l'interrupteur d'alimentation SB est rallumé, ce mode se termine et le circuit revient
Lorsque l'interrupteur d'alimentation SB est à nouveau allumé, ce mode se termine et le circuit revient au premier mode de fonctionnement.
le premier mode de fonctionnement.

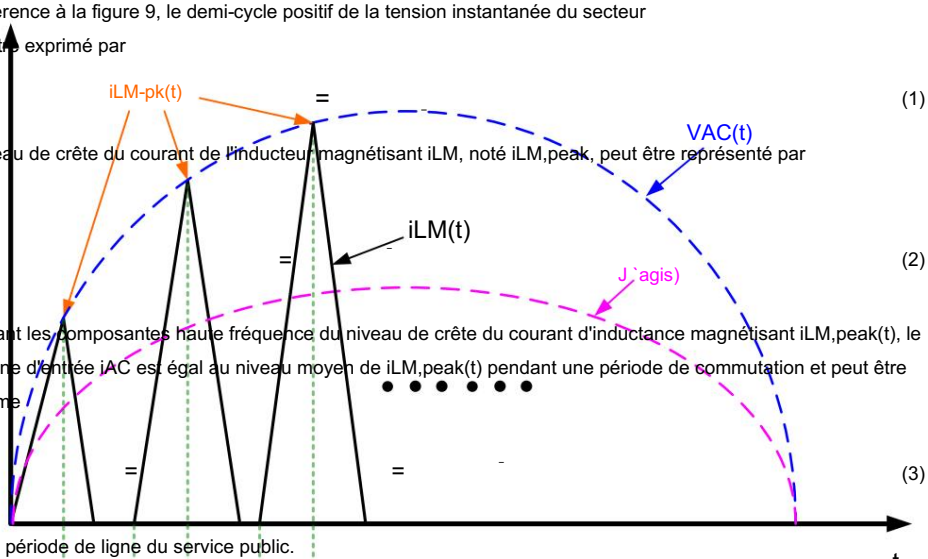


La puissance de sortie nominale PO de la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolet profond est liée à l'efficacité estimée du circuit pilote η multipliée par la broche d'alimentation, qui est exprimée comme suit

Figure 8. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant
Figure 8. Circuit équivalent du circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilisant des diodes SiC Schottky
SiC Schottky à fourni une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolettes profondes pendant le mode 4.
Mode 4.

Réarrangement (5), la formule de conception pour l'inductance de la magnétisation i 2.1.
Directive de conception de l'inducteur magnétisant LM dans le transformateur TR
2.1. Directive de conception de l'inducteur magnétisant LM dans le transformateur TR
Afin de montrer les directives de conception de l'inducteur magnétisant LM
dans le transformateur TR , la figure 9 illustre les formes d'onde théoriques du
courant de l'inducteur magnétisant
ancien TR, la figure 9 illustre les formes d'onde théoriques du courant d'inductance magnétisante
iLM(t), le niveau de crête d' iLM-pk(t) et le courant d'entrée de ligne électrique iAC(t) dans le positif
iLM(t), le niveau de crête d' iLM-pk(t) et le courant de ligne de service public d'entrée iAC(t) dans l'alternance positive de la
tension de ligne de service public vAC(t).
de la tension du réseau électrique vAC(t).

En référence à la figure 9, le demi-cycle positif de la tension instantanée du secteur
Actuel
vAC(t) peut être exprimé par



(1)

Le niveau de crête du courant de l'inducteur magnétisant iLM, noté iLM,peak, peut être représenté par

(2)

En filtrant les composantes haute fréquence du niveau de crête du courant d'inductance magnétisant iLM,peak(t), le courant de ligne d'entrée iAC est égal au niveau moyen de iLM,peak(t) pendant une période de commutation et peut être exprimé comme

(3)

où TAC est la période de ligne du service public.

La valeur moyenne du PIN d'alimentation de ligne de service public d'entrée est obtenue en multipliant la valeur instantanée de la tension de ligne de service public vAC(t) par la valeur instantanée du courant de ligne de service public iAC(t), puis en faisant la moyenne sur une période d'un cycle. , qui est calculé comme suit

Figure 9. Formes d'onde illustratives du courant de l'inducteur magnétisant iLM(t), du niveau de crête d' iLM-pk(t)
Figure 9. Formes d'onde illustratives du courant d'inducteur magnétisant iLM(t), le niveau de crête d' iLM-pk(t) et du
et le courant de ligne de service public d'entrée iAC(t) dans le demi-cycle positif de la tension de ligne de service public vAC(t).
courant de ligne d'entrée iAC(t) dans l'alternance positive de la tension de ligne vAC.

2.2. Directive de conception des condensateurs de sortie CO1 et CO2

La conception des condensateurs de sortie, CO1 et CO2, dépend de la tension de sortie, de la surtension admissible, de la puissance de sortie et de la tension souhaitée. L'ondulation de tension, ΔVO, est la moitié de la valeur crête à crête de la tension de sortie et de la fréquence du secteur, et est fonction de la capacité CO et du condensateur de crête.

Machine Translated by Google

En référence à la figure 9, le demi-cycle positif de la tension instantanée du secteur public vAC(t) peut être exprimé par

$$|vAC(t)| = \sqrt{2}vAC{-}rms|\sin(2\pi\, fACt)| \quad (1)$$

Le niveau de crête du courant de l'inducteur magnétisant iLM, noté iLM,peak, peut être représenté par

$$iLM,peak(t) = \frac{\sqrt{2}vAC{-}rms|\sin(2\pi\, fACt)|DutyTS}{2LM} \quad (2)$$

En filtrant les composantes haute fréquence du niveau de crête du courant d'inductance magnétisante iLM,peak(t), le courant de ligne d'entrée iAC est égal au niveau moyen de iLM,peak(t) pendant une période de commutation et peut être exprimé comme

$$iAC(t) = \frac{1}{TAC}\int_0^{T_{CA}} iLM,pic(t)dt = \sin(2\pi\, fACt)\frac{\sqrt{2}vAC{-}rmsDuty2TS}{4LM} \quad (3)$$

où TAC est la période de ligne du service public.

La valeur moyenne du PIN d'alimentation de ligne de service public d'entrée est obtenue en multipliant la valeur instantanée de la tension de ligne de service public vAC(t) par la valeur instantanée du courant de ligne de service public iAC(t), puis en faisant la moyenne sur une période d'un cycle. , qui est calculé comme suit

$$NIP = \frac{1}{TAC}\int_0^{T_{CA}} vAC(t)iAC(t)dt = \frac{vAC{-}rms\ 2Duty2TS}{4LM} \quad (4)$$

La puissance de sortie nominale PO de la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde est liée à l'efficacité estimée du circuit pilote η multipliée par la puissance d'entrée PIN, qui est exprimée comme suit

$$PO = \eta PIN = \frac{\eta vAC{-}rms\ 2Duty2TS}{4LM} \quad (5)$$

Réarrangement (5), la formule de conception pour l'inductance de l'inducteur magnétisant LM est donné par

$$ML = \frac{\eta vAC{-}rms\ 2Duty2TS}{4PO} \quad (6)$$

2.2. Directive de conception des condensateurs de sortie CO1 et CO2

La conception des condensateurs de sortie, CO1 et CO2, dépend de la tension de sortie CC, de la surtension admissible, de la puissance de sortie et de l' ondulation de tension souhaitée. L'ondulation de tension, ΔVO, est la moitié de la valeur crête à crête de la tension de sortie à deux fois la fréquence du secteur, et est fonction de la capacité CO et du courant de crête du condensateur (qui est égal au courant de sortie IO) et peut être exprimé dans l' équation suivante [23].

$$\Delta VO = IO\sqrt{\left(\frac{1}{2\pi \times 2\, fAC \times CO}\right)^2 + RESR2} \quad (7)$$

En négligeant la résistance série équivalente, notée RESR, de la sortie condensateur, la capacité CO du condensateur de sortie peut être exprimée comme

$$CO \geq \frac{IO}{4\pi\, fAC \times \Delta VO} = \frac{}{PO\ 4\pi\, fAC \times VO \times \Delta VO} \quad (8)$$

De plus, l'ondulation de tension ΔVO est généralement sélectionnée entre 1 % et 5 % de la tension de sortie.

Machine Translated by Google

3. Résultats expérimentaux du circuit pilote d'éclairage électronique proposé utilisant SiC Schottky Didoes pour la fourniture d'une désinfection LED ultraviolette profonde et Lampe de stérilisation

La figure 10 montre une photographie de la désinfection et de la stérilisation par LED ultraviolette profonde. module utilisé dans cet article avec des spécifications qui incluent une longueur d'onde de 275 nm et un angle de pointe de 120 degrés. De plus, le fabricant a connecté un courant constant IC de contrôle en série et une diode Schottky en parallèle pour la protection contre l'inversion de polarité sur le substrat en aluminium dans chaque module de désinfection et de stérilisation par LED ultraviolettes profondes. La spécification de la lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde utilisée dans cet article se compose de dix modules de désinfection et de stérilisation par LED ultraviolettes profondes connecté en série avec une tension nominale de 90 volts, un courant nominal de 40 milliampères et une puissance nominale de 3,6 watts. Le tableau 1 montre une comparaison entre l'ultraviolet profond Module de désinfection et de stérilisation des LED dans [24] et le module utilisé dans cet article. Comme Comme le montre le tableau 1, le module de désinfection et de stérilisation par LED ultraviolettes profondes utilisé dans cet article a une longueur d'onde maximale plus grande, un angle de vision légèrement plus étroit et une puissance de sortie optique et une demi-largeur spectrale légèrement plus grandes que le module de [24]. Le tableau 2 montre les paramètres électriques du prototype d'éclairage électronique à un étage circuit de commande pour la lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds développé en ce papier. La tension d'entrée RMS AC était de 110 volts, et les spécifications de l'ultra profond Une lampe de désinfection et de stérilisation à LED a été utilisée comme paramètres de sortie, notamment : puissance de sortie de 3,6 watts, tension de sortie de 90 volts et courant de sortie de 40 milliampères. De plus, les problèmes de sécurité et de garantie du respect des normes réglementaires en matière d'UV L'exposition et la sécurité électrique incluent : Ne regardez pas directement la source de lumière UV lorsque utiliser une lampe de désinfection et de stérilisation aux ultraviolets profonds, car le rayonnement UV profond peut provoquer érythème cutané, irritation conjonctivale et fatigue. De plus, n'abusez pas des UV profonds lampes de désinfection et de stérilisation comme utilisation prolongée ou contact avec des lampes UV ou directes l'exposition aux rayons UV peut provoquer des lésions cutanées et oculaires.

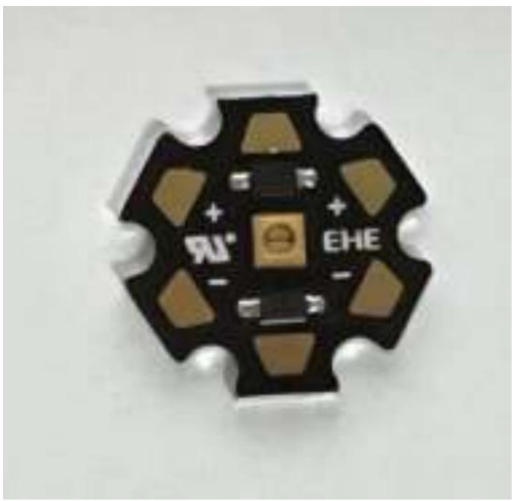


Figure 10. Photographie du module de désinfection et de stérilisation par LED à ultraviolets profonds utilisé dans cette papier avec des spécifications incluant une longueur d'onde de 275 nm et un angle de pointe de 120 degrés.

3.1. Calcul de l'inducteur magnétisant LM dans le transformateur TR

En référence à [6], avec un η de 0,8, un Duty de 0,25, un PO de 3,6 W, une fréquence de commutation fS de 50 kHz (qui est l'inverse de la période de commutation TS), et un VAC-rms de 110 V, l'inductance de l'inducteur magnétisant LM est calculée par

$$ML = \frac{\eta VAC-rms\ 2Duty2TS}{4PO} = \frac{0,8 \times 1102 \times 0,252 \times \frac{1}{50\,000}}{4 \times 3,6} = 834\ \mu H \quad (9)$$

Afin de faire fonctionner le courant de l'inducteur magnétisant dans un mode de conduction discontinue de manière à permettre au circuit pilote d'avoir une fonction de mise en forme du courant d'entrée et d'améliorer le facteur de puissance, l'inducteur magnétisant LM est sélectionné à 800 µH pour le circuit pilote prototype. .

Machine Translated by Google

Tableau 1. Comparaisons entre le module de désinfection et de stérilisation par LED ultraviolettes profondes dans [24] et celui utilisé dans cet article.

Article	La désinfection LED ultraviolette profonde et module de stérilisation dans [24]	La désinfection LED ultraviolette profonde et module de stérilisation utilisé dans ce papier
Valeur typique de la longueur d'onde maximale	255 nm	275 nm
Valeur typique de l' angle de vision de la puissance de sortie optique	3,5 mW	4 mW
Spectre demi-largeur	125 degrés	120 degrés
	11 nm	12 nm

Tableau 2. Spécifications du circuit pilote d'éclairage électronique proposé utilisant des didons SiC Schottky pour fournir une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds.

Paramètre	Valeur
Tension d'entrée AC vAC	110 V
Puissance de sortie nominale PO	3,6 W
Tension de sortie nominale VO	90 V
Courant de sortie nominal IO	40 mA

Afin de faire fonctionner le courant de l'inducteur magnétisant en conduction discontinue mode afin de permettre au circuit pilote d'avoir une fonction de mise en forme du courant d'entrée et pour améliorer le facteur de puissance, l'inducteur magnétisant LM est sélectionné à 800 µH pour le circuit pilote prototype.

3.2. Calcul des condensateurs de sortie CO1 et CO2

En remplaçant les paramètres du circuit dans l'équation (8), avec un PO de 3,6 W, un fAC de 60 Hz, un VO de 90 V, un ΔVO de 2,7 V (soit 3% de la tension de sortie VO), la capacité Le CO peut être obtenu par :

$$CO \geq \frac{PO}{4\pi\, fAC \times VO \times \Delta VO} = \frac{3.6}{4\pi \times 60 \times 90 \times 2,7} = 196,49\ \mu F \quad \text{(dix)}$$

Lors de la mise en œuvre du circuit prototype, les valeurs de capacité des condensateurs de sortie CO1 et CO2 ont été sélectionnés à 220 µF et la tension de tenue à 250 V.

Le tableau 3 montre les spécifications des composants de l'éclairage électronique à un étage prototype de circuit pilote pour la lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds développés dans cet article. De plus, des diodes à porteurs majoritaires avec technologie Schottky sur Les matériaux à large bande interdite en carbure de silicium ont des performances plus élevées et sont utilisés comme sortie diodes DB et DF. En faisant varier le nombre de désinfections ultraviolettes profondes connectées en série et modules de stérilisation utilisés, une conception évolutive du pilote d'éclairage électronique proposé des circuits peuvent être réalisés pour s'adapter à des applications de puissance plus élevée et à une charge variable conditions. En conséquence, la puissance de sortie PO et la tension de sortie VO peuvent varier tout en le courant de sortie IO reste constant et peut être utilisé dans une variété d'applications pratiques scénarios. Paramètres de circuit clés du circuit de commande proposé, tels que la magnétisation l'inductance et le condensateur de sortie peuvent ensuite être repensés.

La figure 11 montre la forme d'onde mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM. La figure 12 montre la forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM. De la figure 12, on peut voir que le courant de l'inducteur magnétisant iLM fonctionne dans le mode de conduction discontinue. La figure 13 montre les formes d'onde mesurées de sortie tension VO et courant de sortie IO, et les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie étaient respectivement de 91,35 volts et 38,57 milliampères. La figure 14 montre les formes d'onde d'ondulation de la tension de sortie VO et du courant de sortie IO.

Machine Translated by Google

La figure 11 montre la forme d'onde mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM.

La figure 12 montre la forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM. Sur la figure 12, on peut voir que le courant de l'inducteur magnétisant iLM fonctionne dans des didones le mode de conduction discontinue. La figure 13 montre les formes d'onde mesurées de la valeur du composant de sortie la tension VO et le courant de sortie IO, et les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie étaient respectivement de 91,35 volts et 38,57 milliampères. La figure 14 montre les formes d'onde d'ondulation de condensateur de filtre CF de la tension de sortie VO et du courant de sortie IO.

Composants clés utilisés dans le circuit pilote d'éclairage électronique proposé utilisant SiC Schottky pour alimenter une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde.

Inductance de	4 mH
Filtre Cf de	220 nF
Diodes D1, D2, D3, D4 Le	MUR460
d'éclairage électronique	IRF730
μH	
fuite Llk 12 μH	
d'ondulation de	VS1-04ES07B-M3
	Condensateur de sortie CO1 , CO2 220 μF/200 V

tableau 4 montre le facteur d'ondulation de la tension de sortie et le facteur d'ondulation du courant de sortie du circuit pilote du prototype de l'interrupteur d'alimentation SB pour une désinfection LED ultraviolette profonde et un inducteur magnétisant LM 800 lampe de stérilisation à une tension d'entrée CA de 110 volts RMS. Comme on peut le voir dans le tableau 4, en divisant l'inducteur de la tension de sortie crête à crête de 143,8 millivolts par la valeur moyenne de 91,35 volts, les 0,1458 et 0,16 donnent un facteur tension de 0,16 % ; divisant le courant de sortie crête à crête par 1,1658 milliampères par la valeur moyenne de 38,57 milliampères donne un facteur d'ondulation actuel de 3,02 %.

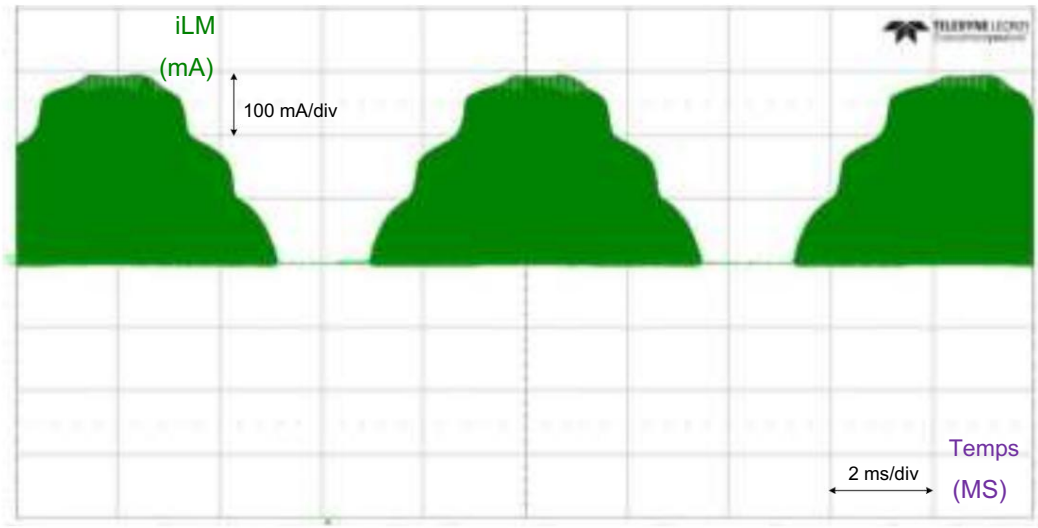


Figure 11. Figure 11. Courant de l'inducteur magnétisant iLM (100 mA/div), échelle de temps : 2 ms/div. iLM (100 mA/

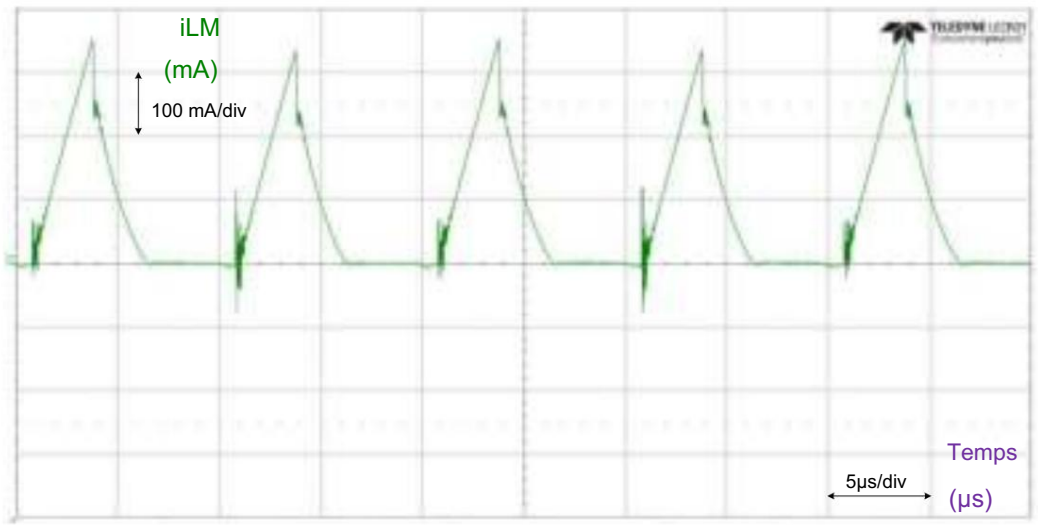


Figure 12. Forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM (100 mA/div) ; temps Figure 12. échelle : 5 μs/div.
Forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM (100 mA/div) ;
échelle de temps : 5 μs/div.

Machine Translated by Google

Figure 12. Forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM (100 mA/div) ; temps Figure 12. Forme d'onde dépliée mesurée du courant de l'inducteur magnétisant iLM (échelle 100 mA/d : 5 µs/div. échelle : 5 µs/div.

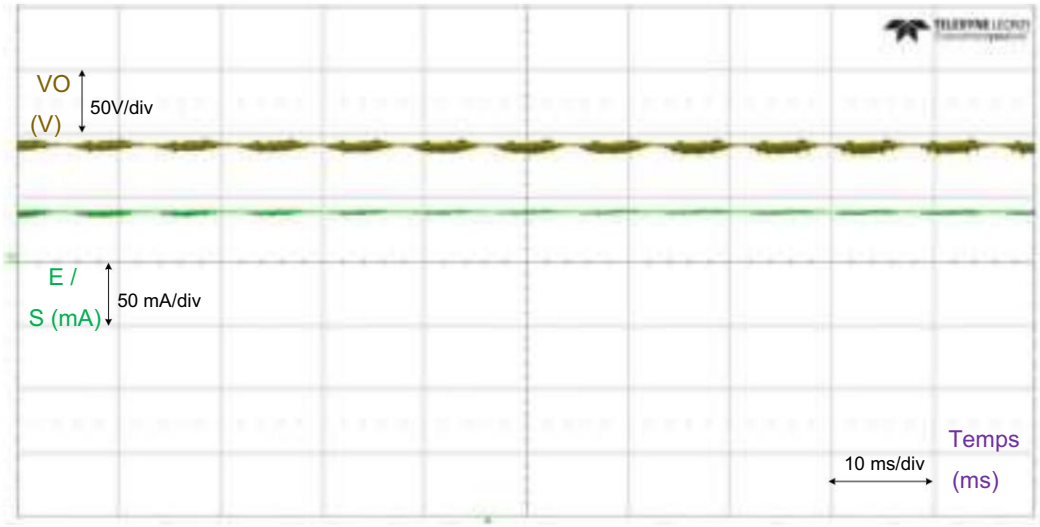


Figure 13. Formes d'onde mesurées de la tension de sortie Vo (50 V/div) et du courant de sortie Io (50 Figure 13. Formes d'onde mesurées de la tension de sortie Vo (50 V/div) et du courant de sortie Io Figure 13. Formes d'onde mesurées de la tension de sortie Vo (50 V/div) et le courant de sortie mA/div ; échelle de temps : 10 ms/div. (50 mA/div) ; échelle de temps : 10 ms/div. mA/div); échelle de temps : 10 ms/div.

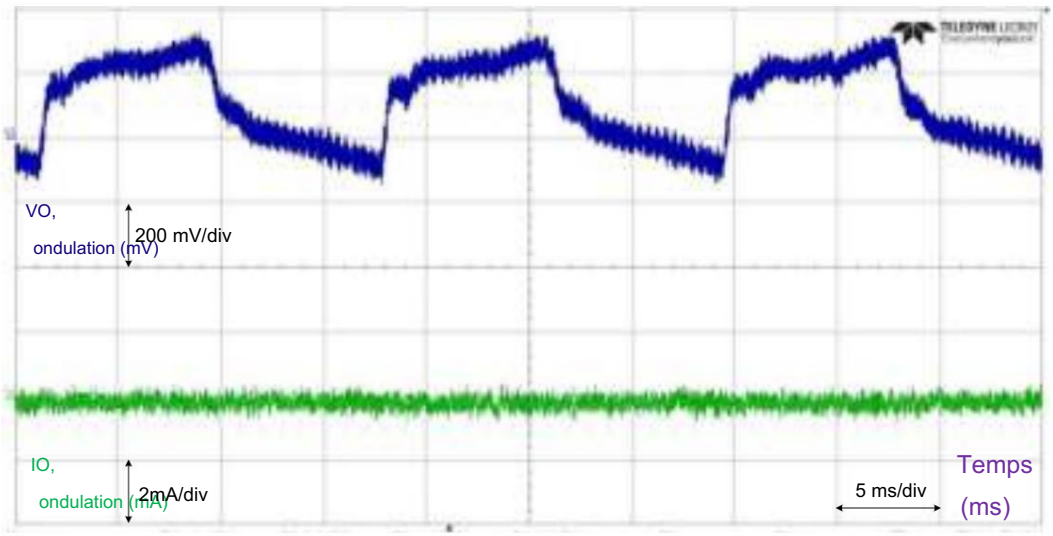


Figure 14. Formes d'onde mesurées de l'ondulation de tension de sortie Vo, ondulation (200 mV/div) et de l' ondulation de courant de sortie Io, ondulation (2 mA/div) ; échelle de temps : 5 ms/div.

Le tableau 4 montre le facteur d'ondulation de la tension de sortie et le facteur d'ondulation du courant de sortie du prototype de circuit pilote d'éclairage électronique pour une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolette profonde à une tension d'entrée CA de 110 volts RMS. Comme le montre le tableau 4, en divisant la tension de sortie crête à crête de 143,8 millivolts par la valeur moyenne de 91,35 volts, on obtient un facteur d'ondulation de tension de 0,16 % ; en divisant le courant de sortie crête à crête de 1,1658 milliampères par la valeur moyenne de 38,57 milliampères, on obtient un facteur d'ondulation du courant de 3,02 %.

La figure 15 montre les formes d'onde mesurées de la tension d'entrée CA vAC et du courant d'entrée iAC. D'après la figure, il peut être indiqué que le courant d'entrée CA suit la tension d'entrée et que les phases des deux formes d'onde sont les mêmes ; par conséquent, le prototype du circuit pilote à un étage proposé pour alimenter la lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds a pour effet de corriger le facteur de puissance. Le facteur de puissance et le facteur de distorsion harmonique total du courant d'entrée ont été mesurés respectivement à 0,9236 et 17,401 % à l'aide d'un analyseur de puissance. De plus, la puissance d'entrée mesurée du circuit de commande prototype est de 3,901 W et la puissance de sortie est de 3,583 W, et le rendement du circuit prototype est de 91,85 %.

Machine Translated by Google

Paramètres	Valeurs
Valeur crête à crête de la tension de sortie	143,8 mV
Valeur moyenne de la tension de sortie	91,35 V
Facteur d'ondulation de la tension de sortie	0,16%
Valeur crête à crête du courant de sortie	1,1658 mA
Valeur moyenne du courant de sortie	38,57 mA
Facteur d'ondulation du courant de sortie	3,02%

Tableau 4. Mesure du facteur d'ondulation de la tension de sortie et du facteur d'ondulation du courant de sortie de l'électronique

Circuit pilote de prototype d'éclairage utilisant des didons SiC Schottky pour une désinfection LED en profondeur par ultraviolets

de la lampe de stérilisation.

La figure 15 montre les formes d'onde mesurées de la tension d'entrée CA vAC et du courant d'entrée et

iAC. D'après la figure, on peut indiquer que le courant d'entrée AC suit la tension d'entrée.

et les phases des deux formes d'onde sont les mêmes ; par conséquent, le prototype du circuit pilote à un étage

de sortie pour fournir une désinfection par LED ultraviolette profonde et la valeur moyenne de la lampe stérilisante

corriger le facteur de puissance. Le facteur de puissance et le facteur d'ondulation total de la tension de sortie

le facteur de distorsion harmonique du courant d'entrée a été mesuré à 0,9236 et 17,401 %,

de puissance. De plus, la puissance d'entrée mesurée de la valeur moyenne du circuit de commande du type

et la puissance de sortie est de 3,583 W, et l'efficacité du facteur d'ondulation du circuit prototype de courant de

Paramètres	Valeurs
Valeur crête à crête de la tension de sortie	143,8 mV
Valeur moyenne de la tension de sortie	91,35 V
Facteur d'ondulation de la tension de sortie	0,16%
Valeur crête à crête du courant de sortie de courant de sortie est de 3,901 W	1,1658 mA
Valeur moyenne du courant de sortie	38,57 mA
Facteur d'ondulation du courant de sortie	3,02%

sortie est de 91,85 %.

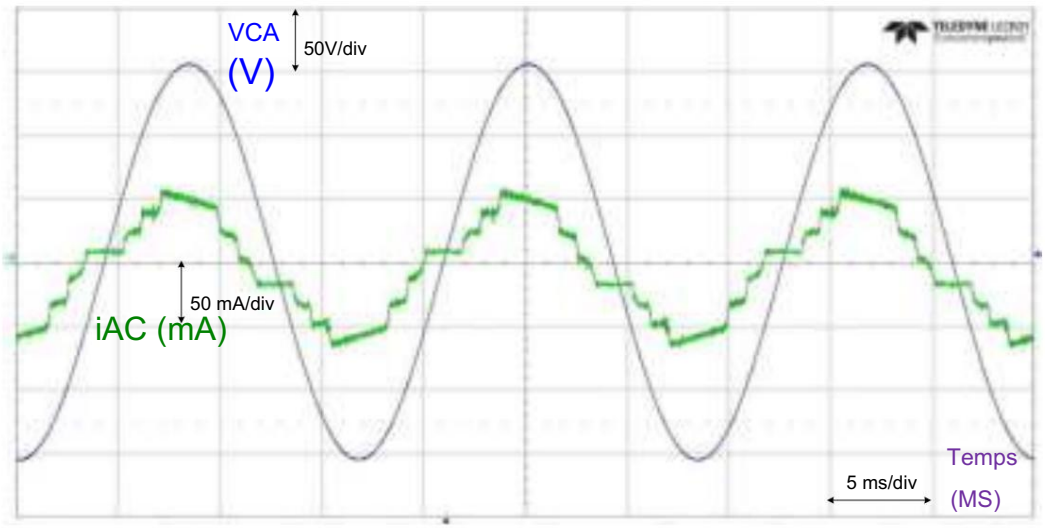


Figure 15. Tension de ligne d'entrée mesurée vAC (50 V/div) et courant iAC (50 mA/div) ; échelle de temps : Figure 15. Tension de ligne d'entrée mesurée vAC (50 V/div) et courant iAC (50 mA/div), temps

échelle : 5 ms/div. 5 ms/div.

Le tableau 5 montre une comparaison entre le pilote de LED AC-DC existant

dans [19] qui intègre un convertisseur abaisseur-élévateur inverse avec

un amortisseur sans perte et fournit un convertisseur abaisseur-boost inverse de 18 W

(60 V/0,3 A), et celui proposé qui intègre un convertisseur abaisseur et un flyback

convertisseur fly-back afin d'alimenter une puissance nominale de 3,6 W (90 V/0,04 A). Comme mentionné dans le tableau 3,

Tableau 3. Les deux pilotes de LED sont alimentés par une tension alternative d'entrée de 110 V et utilisent une seule alimentation.

interrupteur. Le circuit pilote de LED AC-DC proposé permet d'économiser un condensateur et

un élément magnétique par rapport à celui de [19]. De plus, le THD et l'efficacité du circuit de

le pilote de LED AC-DC proposé est meilleur que celui du pilote existant.

L'efficacité du pilote de LED AC-DC proposé est meilleure que celle du pilote existant.

Tableau 5. Comparaisons entre le pilote de LED AC-DC existant dans [19] et celui proposé.

Article	Pilote de LED AC-DC existant dans Référence [19]	Pilote de LED AC-DC proposé
Topologie des circuits	Intégration d'un buck-boost inverse convertisseur avec un amortisseur sans perte	Intégration d'un convertisseur Buck et d'un convertisseur flyback
Tension CA d'entrée	110 V	110 V
Puissance de sortie	18 W (60 V/0,3 A) 1	3,6 W (90 V/0,04 A)
Nombre de commutateurs requis		1
Nombre de condensateurs requis	4	3
Nombre d'éléments magnétiques requis	3	2
Nombre de diodes requises	7	6
Facteur de puissance mesuré	0,9737	0,9236
Courant mesuré THD	18,422%	17,401%
Efficacité du circuit mesurée	85,01%	91,85%

Machine Translated by Google

4. Conclusions

Cet article propose un circuit pilote de prototype d'éclairage électronique à un étage utilisant des didons SiC Schottky pour une lampe de désinfection et de stérilisation à LED à ultraviolets profonds, qui intègre un convertisseur abaisseur et un convertisseur flyback pour former un interrupteur AC-DC à un seul étage et à alimentation unique. architecture de circuit de convertisseur de puissance avec une fonction de correction de facteur. En concevant l'inductance du convertisseur de puissance AC-DC pour qu'elle fonctionne en mode de conduction discontinue, l'effet de correction du facteur de puissance peut être obtenu naturellement. De plus, le circuit pilote d'éclairage électronique à un étage proposé utilise une diode Schottky à porteuse majoritaire constituée d'un matériau semi-conducteur à large bande interdite en carbure de silicium et récupère l' énergie de l'inductance de fuite du transformateur, améliorant ainsi l'efficacité de conversion du circuit pilote. Dans cet article, un prototype de circuit pilote d'éclairage électronique LED à ultraviolets profonds de 3,6 watts pour une lampe de désinfection et de stérilisation a été développé et testé. À une tension d'entrée CA de 110 volts RMS et à la puissance de sortie nominale, les résultats étaient : facteur d'ondulation de la tension de sortie inférieur à 1 %, facteur d'ondulation du courant de sortie inférieur à 4 %, facteur de puissance supérieur à 0,9, facteur de distorsion harmonique totale du courant d'entrée inférieur supérieur à 18 % et une efficacité du circuit supérieure à 90 %. Le circuit pilote de prototype d'éclairage électronique à LED ultraviolet profond à un étage proposé dans cet article peut simplifier le nombre d' interrupteurs d'alimentation requis dans le circuit de commande et présente une efficacité de ci

Contributions des auteurs : C.-AC a développé la topologie du circuit du pilote d'éclairage électronique et conçu la méthodologie ; C.-HC, H.-LC et E.-CC ont organisé les ressources logicielles et mis en place la simulation ainsi que les simulations de circuits réalisées ; L.-FL, S.-HH et C.-KL ont mis en œuvre le prototype de circuit pilote d'éclairage électronique, effectué les mesures du circuit et analysé les résultats expérimentaux sous la direction de C.-AC ; C.-AC a préparé la première version de l' article et révisé le manuscrit pour soumission. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par le Conseil national des sciences et technologies (NSTC) de Taiwan pour ses numéros de subvention MOST 110-2221-E-214-014, NSTC 111-2221-E-214-011 et NSTC 112-2221 -E. -214-005.

Déclaration de disponibilité des données : Les données présentées dans cette étude sont disponibles dans l'article.

Remerciements : Les auteurs souhaitent exprimer leur plus sincère gratitude au Conseil national des sciences et technologies (NSTC) de Taiwan pour ses numéros de subvention MOST 110-2221-E-214-014, NSTC 111-2221-E-214-011 et NSTC. 112-2221-E-214-005.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Kebbi, Y. ; Mohammed, AI ; Sant'Ana, AS; Prado-Silva, LD; Liu, D. ; Ding, T. Progrès récents sur l'application de la technologie UV-LED pour l'inactivation microbienne : progrès et mécanisme. Compr. Révérend Food Sci. Sécurité alimentaire. 2020, 19, 3501-3527. [Référence croisée] [Pub Med]
2. Chatalov, M. ; Jain, R. ; Saxena, T. ; Dobrinsky, A. ; Shur, M. Développement de LED UV profondes et problèmes actuels dans la technologie des matériaux et des dispositifs. Dans les semi-conducteurs et semi-métaux ; Elsevier : Amsterdam, Pays-Bas, 2017 ; Volume 96, p. 45-83.
3. Koutchma, T. ; Popovic, V. ; Green, A. Présentation de la technologie des LED ultraviolettes (UV) pour les applications dans la production alimentaire. Dans Technologie LED ultraviolette pour les applications alimentaires ; Academic Press : Cambridge, MA, États-Unis, 2019 ; p. 1 à 23.
4. Akgün, député; Ünlütürk, S. Effets des diodes électroluminescentes (DEL) ultraviolettes sur l'inactivation microbienne et enzymatique du jus de pomme. Int. J. Microbiol alimentaire. 2017, 260, 65-74. [Référence croisée] [Pub Med]
5. Kaya, Z. ; Yildiz, S. ; Ünlütürk, S. Effet de l'irradiation UV-C et du traitement thermique sur la stabilité de la durée de conservation d'un jus de citron-melon blend : Approche statistique multivariée. Innover. Science alimentaire. Émerger. Technologie. 2015, 29, 230-239. [Référence croisée]
6. Guan, Z. ; Liu, P. ; Zhou, T. ; Zhou, L. ; Zhang, D. ; Xie, Q. ; Yu, Q. ; Hé.; Wang, S. ; Wang, X. ; et coll. Étude sur la régulation du champ lumineux de la désinfection UVC-LED pour le transport sous chaîne du froid. Appl. Sci. 2022, 12, 1285. [CrossRef]
7. Liang, JJ; Liao, CC; Chang, CS; Lee, CY ; Chen, SY; Huang, SB; Ouais, YF ; Singh, KJ; Kuo, SC; Lin, YL; et coll. L' efficacité des prototypes de dispositifs à lumière ultraviolette lointaine (UVC) avec différentes longueurs d'onde pour désinfecter le SRAS-CoV-2. Appl. Sci. 2021, 11, 10661. [CrossRef]
8. Juarez-Léon, FA ; Soriano-Sanchez, AG; Rodriguez-Licea, MA; Perez-Pinal, FJ Conception et mise en œuvre d'un produit germicide Lampe UVC-LED. Accès IEEE 2020, 8, 196951-196962. [Référence croisée] [Pub Med]

Machine Translated by Google

9. Alonso, JM ; Costa, MAD; Ordiz, C. Convertisseur Buck-Flyback intégré en tant qu'alimentation hors ligne à facteur de puissance élevé. IEEE Trans. Ind. Électron. 2008, 55, 1090-1100. [Référence croisée]
10. Gacio, D. ; Alonso, JM; Calleja, AJ; Garcia, J. ; Rico-Secades, M. Une alimentation universelle à entrée unique à facteur de puissance élevé pour les LED HB basée sur un convertisseur abaisseur-flyback intégré. IEEETrans. Ind. Électron. 2010, 58, 589-599. [Référence croisée]
11. Abdelmessih, GZ; Alonso, JM; Costa, Analyse de perte MAD pour l'amélioration de l'efficacité du pilote de LED Buck-Flyback intégré. IEEETrans. Ind. 2018, 54, 6543-6553. [Référence croisée]
12. Abdelmessih, GZ; Alonso, JM; Tsai, WT Analyse et expérimentation sur un nouveau driver de LED hors ligne à facteur de puissance élevé basé sur sur convertisseur flyback abaisseur intégré entrelacé. IEEETrans. Ind. 2019, 55, 4359-4369. [Référence croisée]
13. Luz, PC ; Bolán, PE ; Maboni, T. ; Cosétine, MR ; da Silva, MF; do Prado, RN Un convertisseur Buck-Boost-Flyback isolé intégré pour alimenter les lampes LED vers l'éclairage public avec des capacités réduites. Dans les actes de la 11e conférence internationale IEEE/IAS 2014 sur les applications industrielles, Juiz de Fora, Brésil, 7-10 décembre 2014 ; p. 1 à 6.
14. Divya, KM ; Parackal, R. Convertisseur flyback abaisseur-boost intégré à facteur de puissance élevé pilotant plusieurs sorties. Dans Actes de la Conférence internationale en ligne 2015 sur l'ingénierie et les technologies vertes (IC-GET), Coimbatore, Inde, 27 novembre 2015 ; p. 1 à 5.
15. Cheng, Californie ; Chung, TY Un nouveau pilote intégré avec PFC pour l'alimentation de diodes électroluminescentes. Dans Actes de la 41e conférence annuelle de l'IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), Yokohama, Japon, 9-12 novembre 2015 ; pages 3514 à 3518.
16. Poorali, B. ; Adib, E. Analyse du convertisseur SEPIC-flyback intégré en tant que correction du facteur de puissance à un seul étage et à commutateur unique Pilote LED. IEEETrans. Ind. Électron. 2016, 63, 3562-3570. [Référence croisée]
17. Cheng, C.-A. ; Chang, CH-H.; Cheng, HL ; Chang, M.-T. Un nouveau pilote de LED avec correction du facteur de puissance adapté aux applications d'éclairage public. Dans Actes de la Conférence internationale sur l'électronique des énergies futures 2017 (IFEEC 2017) — ECCE Asia, Kaohsiung, Taiwan, 3-7 juin 2017 ; p. 1 à 4.
18. Cheng, Californie ; Chang, CH; Cheng, HL; Chang, CE; Lai, CC Un nouveau driver de lampe à tube LED avec correction du facteur de puissance pour les applications d'éclairage intérieur. Dans les actes de la 7e Conférence mondiale de l'IEEE sur l'électronique grand public (GCCE) 2018, Nara, Japon, 9-12 octobre 2018 ; pp. 700-701.
19. Cheng, Californie ; Chen, YL; Chen, YJ; Lai, SW Une nouvelle alimentation AC-DC économique pour les applications d'éclairage LED intérieur. Dans les actes de la conférence IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering (APPEEC) 2019, Macao, Chine, 1er-4 décembre 2019 ; p. 1–3.
20. Cheng, Californie ; Lan, LF; Hou, SH; Lin, CK Un pilote d'éclairage électronique à un étage pour une lampe de désinfection et de stérilisation à LED ultraviolettes profondes. Dans les actes de l'atelier IEEE 2023 sur les dispositifs et applications d'alimentation à large bande passante en Asie (WiPDA Asia), Hsinchu, Taiwan, 27-29 août 2023 ; p. 1–3.
21. Utilisation efficace des dispositifs électriques – Compréhension des dispositifs électriques en carbure de silicium et exemples d'application utilisant les mérites. ROHM Semiconductor, 2017. Disponible en ligne : https://pages.rohm.com.tw/rs/247-PYD-578/images/TechWeb_E_DL_SiC.pdf (consulté le 31 juillet 2024).
22. Note d'application sur les dispositifs et modules d'alimentation SiC, ROHM Semiconductor, 2020. Disponible en ligne : https://fscdn.rohm.com/en/produits/databook/applinote/discrete/sic/common/sic_appli-e.pdf (consulté le 31 juillet 2024).
23. AN966 APPLICATION NOTE, STMicroelectronics, « L6561, ENHANCED TRANSITION MODE POWER FACTOR CORRECTOR », pp. 1–23, mars 2003. Disponible en ligne : https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00004002-l6561 -correcteur-de-facteur-de-puissance-mode-transition -amélioré -stmicroelectronics.pdf (consulté le 31 juillet 2024).
24. SÉOULVIOSYS. Série UV CA3535 (CUD5GF1B). Disponible en ligne : https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seoul%20Semi-conducteur/CUD5GF1B_R0.1_Prelliminary_2-3-20.pdf (consulté le 31 juillet 2024).

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Réduction efficace de la dimensionnalité du signal vocal grâce à Techniques à valeur complexe

Sungkyun Ko [1] et Parc Minho 2,*

[1] Département de convergence informatique de l'IA, Université Soongsil, Séoul 06978, République de Corée ;
[2] kosungkyun@naver.com École d'ingénierie électronique, Université Soongsil, Séoul 06978, République de Corée
* Correspondance : mhp@ssu.ac.kr

Résumé : Dans cette étude, nous proposons l'algorithme CVMFCC-DR (Complex-Valued Mel-Frequency Cepstral Co- efficients Dimensionality Reduction) comme méthode efficace pour réduire la dimensionnalité des signaux vocaux. En utilisant la technique MFCC à valeurs complexes, qui prend en compte à la fois les composants réels et imaginaires, notre algorithme permet une réduction de dimensionnalité sans perte d'informations tout en réduisant les coûts de calcul. L'efficacité de l'algorithme proposé est validée par des expériences qui démontrent son efficacité dans la construction d'un modèle de reconnaissance vocale utilisant un réseau neuronal à valeurs complexes. De plus, une méthode d'interprétation softmax à valeurs complexes pour les nombres complexes est introduite. Les résultats expérimentaux indiquent que l'approche donne des performances améliorées par rapport aux techniques traditionnelles basées sur MFCC, soulignant ainsi son potentiel dans le domaine de la reconnaissance vocale.

Mots clés : coefficients cepstraux de fréquence Mel ; correction d'erreurs de réseau neuronal à valeurs complexes ; rétropropagation ; softmax à valeur complexe

check for updates

Citation : Ko, S. ; Park, M. Réduction efficace de la dimensionnalité du signal vocal à l'aide de techniques à valeur complexe. Électronique 2024, 13, 3046. https://doi.org/10.3390/électronique13153046

Rédacteurs académiques : Xin Geng, Padma Iyenghar et Elke Pulvermüller

Reçu : 3 juin 2024
Révisé : 31 juillet 2024
Accepté : 31 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Aujourd'hui, le traitement et la reconnaissance des signaux vocaux jouent un rôle crucial dans divers domaines d'application. Ces technologies sont utilisées à diverses fins, telles que la conversion de commandes vocales en texte ou l'identification du propriétaire d'une voix. Les progrès de la technologie de reconnaissance vocale peuvent améliorer l'interaction homme-machine, améliorant ainsi la productivité et l'efficacité dans diverses industries. Cependant, les signaux vocaux possèdent des formes très diverses et des caractéristiques de grande dimension, ce qui rend leur traitement et leur reconnaissance efficaces un défi persistant. La diversité et la grande dimensionnalité des signaux vocaux rendent difficile la réduction de la dimensionnalité et la reconnaissance des formes, entraînant une augmentation des coûts de calcul. Par conséquent, réduire efficacement la dimensionnalité des signaux vocaux et améliorer les performances des modèles de reconnaissance vocale basés sur les réseaux neuronaux constitue un défi de taille.

Les technologies de traitement et de reconnaissance vocales sont essentielles dans diverses applications, telles que les interfaces vocales, les assistants virtuels et la traduction automatique. L'obtention de résultats de traitement et de reconnaissance des signaux vocaux plus précis et plus efficaces peut améliorer considérablement l'expérience utilisateur des services associés. Par conséquent, des recherches continues sont menées dans le domaine du traitement et de la reconnaissance des signaux vocaux. Les signaux vocaux présentent des caractéristiques de grande dimension, ce qui rend difficile une réduction efficace de la di
De plus, la reconnaissance précise de divers modèles de parole nécessite des modèles de réseaux neuronaux complexes, ce qui, à son tour, augmente les coûts de calcul [1]. Par conséquent, réduire efficacement la dimensionnalité des signaux vocaux sans perte d'informations et améliorer simultanément la précision et l'efficacité des modèles de reconnaissance vocale basés sur les réseaux neuronaux est une tâche cruciale.

Malgré la riche littérature sur les réseaux à valeurs complexes, il existe peu d'exemples de leur application dans le traitement de l'audio ou de la parole. Étant donné que le système auditif humain

Machine Translated by Google

traite le son dans le domaine fréquentiel, il est également utile d'explorer des réseaux neuronaux à valeurs complexes pour le traitement audio plutôt que de s'appuyer uniquement sur des réseaux neuronaux à valeur réelle dans le domaine temporel [2].

Des recherches récentes ont fait des progrès significatifs dans la reconnaissance vocale en combinant des méthodes traditionnelles telles que les coefficients cepstraux de fréquence Mel (MFCC) avec les réseaux de neurones [3]. Bien que la technique MFCC ait été largement utilisée pour l'extraction de caractéristiques vocales, elle présente l' inconvénient de ne pas pouvoir effectuer de réduction de dimensionnalité sans perte, car elle utilise uniquement des valeurs réelles. En d'autres termes, la réduction du nombre de MFCC entraîne une perte d'informations, ce qui diminue la précision de la reconnaissance vocale. Ces méthodes présentent encore une efficacité limitée et des approches améliorées au-delà des méthodes d'apprentissage traditionnelles sont nécessaires.

L'utilisation de la représentation complexe de MFCC permet de prendre en compte à la fois les parties réelles et imaginaires, permettant ainsi une réduction de dimensionnalité sans perte. De plus, l'utilisation de réseaux neuronaux à valeurs complexes peut refléter les changements de phase via des opérations de multiplication complexes [4], représentant mieux les caractéristiques des signaux vocaux. Cette approche devrait permettre une réduction de dimensionnalité et une reconnaissance vocale basée sur un réseau neuronal plus efficaces par rapport aux méthodes existantes.

Dans cette étude, nous proposons l'algorithme CVMFCC-DR pour une réduction efficace et sans perte de la dimensionnalité du signal vocal. En combinant CVMFCC-DR avec des réseaux neuronaux à valeurs complexes, cette technique peut démontrer des performances de reconnaissance vocale supérieures à celles des méthodes existantes.

Les principales contributions de cette étude sont les suivantes :

- Proposer une technique efficace de réduction de dimensionnalité (CVMFCC-DR) utilisant la représentation complexe des MFCC.
- Améliorer les performances de reconnaissance vocale en combinant des MFCC à valeurs complexes et des réseaux neuronaux à valeurs complexes.
- Proposer une nouvelle méthode d'interprétation pour une fonction softmax à valeurs complexes avec entrées complexes.

Cet article commence par présenter la technique MFCC existante et les réseaux de neurones à valeurs complexes. Il fournit ensuite une explication détaillée de l'algorithme CVMFCC-DR proposé et de la méthode d'apprentissage pour les réseaux de neurones à valeurs complexes [5]. Par la suite, l'efficacité de la méthode proposée est validée expérimentalement et les résultats sont analysés. Enfin, l'article se termine par un résumé des résultats de l'étude et suggère des orientations pour de futures recherches.

2. Travaux connexes

Dans le domaine de la reconnaissance vocale, diverses approches et techniques basées sur les réseaux neuronaux sont utilisées. Différents types de réseaux de neurones, tels que les CNN, les RNN, les LSTM et les DNN, sont utilisés, chacun avec ses propres avantages et inconvénients [3]. De plus, des modèles hybrides combinant des méthodes traditionnelles avec des structures de réseaux neuronaux sont également étudiés. Les modèles hybrides peuvent optimiser les performances en combinant les atouts de chaque structure, mais ils présentent également l'inconvénient d'une complexité accrue dans la mise en œuvre et l'interprétation [6].

Au milieu de ces développements, les techniques traditionnelles d'extraction de caractéristiques comme la technique MFCC sont encore largement utilisées comme entrées pour les réseaux de neurones [3]. De plus, l'exploration de nouvelles architectures neuronales telles que les réseaux neuronaux à valeurs complexes pourrait découvrir de nouvelles perspectives et des avancées potentielles dans les capacités de reconnaissance vocale. Récemment, des études ont montré que les FPGA peuvent être utilisés pour améliorer considérablement la vitesse de calcul des nombres complexes [7]. Ces résultats de recherche démontrent empiriquement que la mise en œuvre matérielle d'opérations sur des nombres complexes peut entraîner des améliorations pratiques des performances. De plus, une étude récente a mis en œuvre des réseaux neuronaux à valeur complexe sur des FPGA à des fins de classification, démontrant une précision supérieure par rapport aux réseaux neuronaux à valeur réelle et obtenant des améliorations de vitesse significatives par rapport aux systèmes basés sur CPU [8]. Cela laisse penser qu'à l'avenir, les processeurs qui ne prennent actuellement en charge que les opérations sur des nombres réels pourront un jour prendre également en charge les opérations sur les nombres complexes.

Machine Translated by Google

Sur la base de ces études, l'utilisation de représentations de nombres complexes permet le codage de paires de nombres réels sous forme de nombres complexes uniques, réduisant ainsi de moitié la dimension d'entrée. Cette réduction de dimensionnalité diminue le nombre de paramètres du modèle et améliore l'efficacité des calculs. Par conséquent, des preuves expérimentales montrent que les réseaux de neurones à valeurs complexes peuvent atteindre des performances égales ou supérieures avec moins de paramètres par rapport aux réseaux de neurones conventionnels à valeurs réelles.

Alors que la recherche continue de repousser les limites, une combinaison synergique de méthodes éprouvées et d'approches innovantes pourrait ouvrir la voie à la prochaine génération de systèmes de reconnaissance vocale robustes et performants.

3. Connaissances de base

Diverses études sont menées dans le domaine de la reconnaissance et de la classification de la parole, et dans cette section, nous introduisons les MFCC (coefficients cepstraux mel-fréquence) [3]. La technique MFCC est l'une des méthodes d'extraction de caractéristiques couramment utilisées dans les domaines du traitement du signal vocal et de la reconnaissance vocale. La technique MFCC représente les caractéristiques de fréquence des signaux vocaux et est principalement utilisée pour représenter et reconnaître efficacement les signaux vocaux. Le principe de base de la technique MFCC est illustré dans la figure 1.

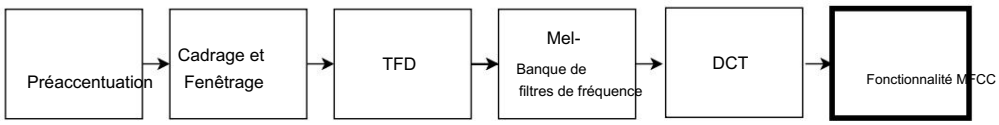


Figure 1. Un aperçu du processus de la technique MFCC.

Préaccentuation : la préaccentuation est essentiellement un filtre passe-haut. En raison de la structure du corps humain, les composantes haute fréquence ont tendance à diminuer dans le son réellement émis lors de la production de la parole. Par conséquent, la préaccentuation est le processus consistant à appliquer un filtre passe-haut pour amplifier en premier les composantes haute fréquence atténuées.

Cadrage et fenêtrage : les signaux vocaux sont divisés en courts segments appelés trames pour analyse. Cela est dû au fait que les caractéristiques de la parole restent relativement stables sur de brèves périodes. Ces images se chevauchent légèrement pour capturer plus efficacement les changements de parole.
Chaque image est traitée à l'aide d'une technique de fenêtre, ce qui améliore l'analyse. Les types de fenêtres courants incluent les fenêtres Hamming et Hanning. Cette méthode de cadrage permet une analyse plus précise de données vocales complexes, ce qui est crucial pour le développement de technologies de reconnaissance et de synthèse vocales. Bien que les détails spécifiques de mise en œuvre puissent varier, ces principes fondamentaux sont largement utilisés dans les systèmes de traitement de la parole.

Transformée de Fourier discrète : pour calculer le spectre de puissance, la DFT (Transformation de Fourier discrète) est utilisée pour calculer le spectre de puissance pour chaque image obtenue précédemment. Ce processus permet de discerner la distribution d'énergie spécifique à la fréquence du signal vocal sur chaque trame.

Banque de filtres Mel-Frequency : Le filtre passe-bande Mel est un ensemble de filtres conçus pour extraire les signaux vocaux de manière non linéaire, imitant le système auditif humain.
Généralement construit avec 40 filtres triangulaires, il analyse les caractéristiques fréquentielles des signaux vocaux.

Transformée en cosinus discrète : La DCT (Transformation en cosinus discrète) exprime une séquence finie de points de données sous la forme d'une somme de fonctions cosinus oscillant à différentes fréquences. Dans le processus MFCC, la DCT est appliquée au banc de filtres Mel pour sélectionner les coefficients d'accélération ou pour séparer la relation en amplitudes log-spectrales du banc de filtres.

La reconnaissance vocale utilisant les MFCC peut être utilisée efficacement dans divers environnements [9], et cette méthode peut atteindre une grande précision lorsqu'elle est combinée avec des modèles d'apprentissage profond. Par conséquent, MFCC constitue un apport crucial pour les modèles d'apprentissage profond pour la reconnaissance vocale [10].

Machine Translated by Google

4. Méthode proposée

Dans cette section, nous proposons une méthode pour effectuer efficacement une réduction de dimensionnalité du signal vocal en utilisant des MFCC à valeurs complexes et des réseaux de neurones à valeurs complex
Un aperçu de l'approche proposée est présenté dans la figure 2. Cette figure illustre l' approche proposée pour la classification vocale à l'aide de réseaux neuronaux à valeurs complexes. Le processus commence par une saisie vocale, suivie d'une extraction de caractéristiques à l'aide de coefficients cepstraux à fréquence Mel (MFCC). Ces caractéristiques sont ensuite soumises à une réduction de dimensionnalité et transformées en représentations à valeurs complexes, ce qui donne lieu à des MFCC à valeurs complexes. Les caractéristiques traitées sont ensuite entrées dans un réseau neuronal à valeurs complexes. Les performances du réseau sont améliorées grâce à la sélection de fonctions d'activation et d'algorithmes d'apprentissage appropriés. En fin de compte, la sortie du réseau neuronal est utilisée à des fins de classification.

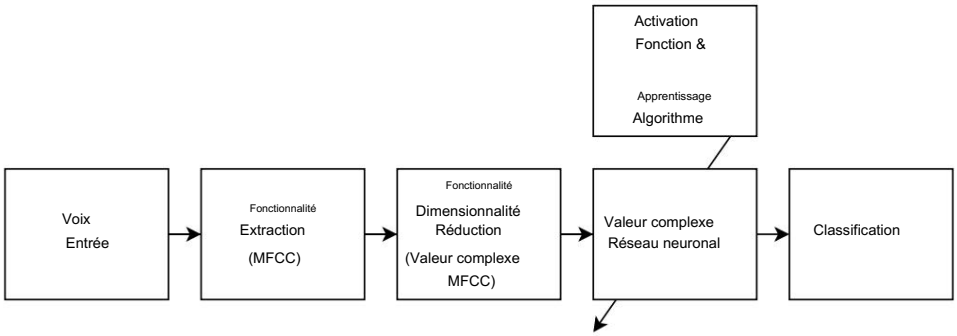


Figure 2. Aperçu de l'approche proposée.

MFCC à valeur complexe : le nombre de MFCC utilisés dans la reconnaissance vocale peut varier en fonction des applications et des modèles spécifiques. Cependant, généralement, des MFCC allant de 13 à 40 sont utilisés. Cette gamme est connue pour fonctionner efficacement dans divers systèmes de reconnaissance vocale. Généralement, un nombre plus élevé de MFCC peut permettre au modèle de capturer plus de détails fréquentiels et spectraux, mais cela augmente également le coût de calcul du modèle. Par conséquent, le nombre sélectionné de MFCC est déterminé en tenant compte d'un équilibre entre l'efficacité de calcul et les performances du modèle.

Pour représenter des problèmes physiques à l'aide de nombres complexes, il existe deux méthodes principales. L'une est une méthode de substitution simple et l'autre est une approche plus élégante connue sous le nom d'équivalence mathématique, comme la transformée de Fourier. La substitution prend deux paramètres physiques réels et en place un dans la partie réelle du nombre complexe et un dans la partie imaginaire. Cela permet aux deux valeurs d'être manipulées comme une seule entité, c'est-à-dire un seul nombre complexe [11]. La méthode proposée pour la réduction de dimensionnalité dans cet article consiste à convertir n valeurs MFCC en nombres complexes. Le premier MFCC est utilisé comme partie réelle et le deuxième MFCC est utilisé comme partie imaginaire du nombre complexe. Par la suite, chaque MFCC alterne entre les parties réelle et imaginaire du nombre complexe. Ce modèle se poursuit jusqu'au nième MFCC, ce qui donne lieu à n/2 nombres complexes. Par exemple, lorsque nous avons n valeurs MFCC, elles pourraient être les suivantes :

$$[x1, x2, x3, x4, \ldots, xn-1, xn]$$

Dans ce cas, le premier MFCC x1 est utilisé comme partie réelle du premier nombre complexe. Le deuxième MFCC x2 est utilisé comme partie imaginaire du premier nombre complexe. Le troisième MFCC x3 est utilisé comme partie réelle du deuxième nombre complexe. Le quatrième MFCC x4 est utilisé comme partie imaginaire du deuxième nombre complexe. Ce modèle continue en alternance entre parties réelles et imaginaires jusqu'au nième MFCC xn, qui devient la partie imaginaire du (n/2)-ième nombre complexe. Par conséquent, avec n valeurs MFCC, n/2 nombres complexes sont générés. Le premier nombre complexe est x1 + jx2, le deuxième nombre complexe

Machine Translated by Google

le nombre est x3 + jx4, et ainsi de suite jusqu'au dernier nombre complexe, qui est xn−1 + jxn. Nous avons illustré cette explication dans la figure 3.

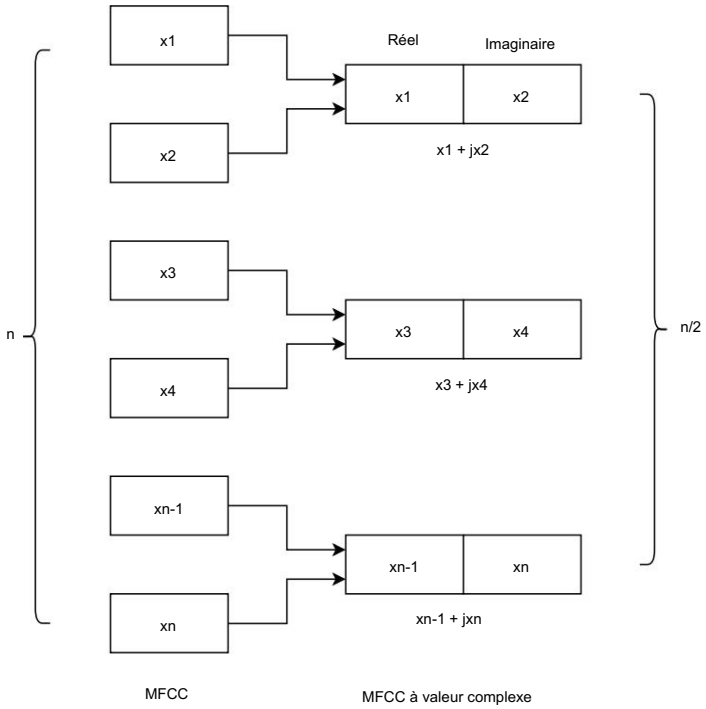


Figure 3. Processus de génération de MFCC à valeurs complexes.

Réseau neuronal à valeur complexe : les réseaux neuronaux à valeur complexe sont des modèles de réseau neuronal qui utilisent des nombres complexes comme valeurs d'entrée ou poids, et ils ont l'avantage de gérer des informations plus riches par rapport aux réseaux neuronaux à valeur réelle. En outre, diverses études de recherche ont été menées dans divers domaines, et des méthodes de réduction de dimensionnalité à valeurs complexes ou de classification et de détection à l'aide de nombres complexes sont utilisées efficacement. Pour cela, la multiplication des entrées complexes et des poids complexes est effectuée, ce qui implique une rotation dans le plan complexe et introduit ainsi des changements de phase [5]. La somme de la multiplication de l'entrée X et du poids W peut être représentée par les équations (1) et (2).

$$Z = W0 + W1X1 + W2X2 + \ldots + WnXn \quad (1)$$

$$Z = \sum n\ Wn \cdot Xn \quad (2)$$

Fonction d'activation et algorithme d'apprentissage : dans les réseaux neuronaux à valeurs complexes, une fonction d'activation dépendante de la phase est utilisée, forçant les informations d'amplitude à être normalisées à un cercle unité de 1 et uniquement l'extraction des informations de phase, comme le montre l'équation (3).

$$P(Z) = \frac{Z}{|Z|} = e^{j \cdot \arg(Z)} \quad (3)$$

L'algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones à valeurs complexes est le suivant. Lorsqu'il existe une cible souhaitée t et une valeur de sortie z, comme le montre la figure 4, les poids sont ajustés selon l'équation (4) pour se déplacer progressivement dans la direction de la cible souhaitée [12].

Machine Translated by Google

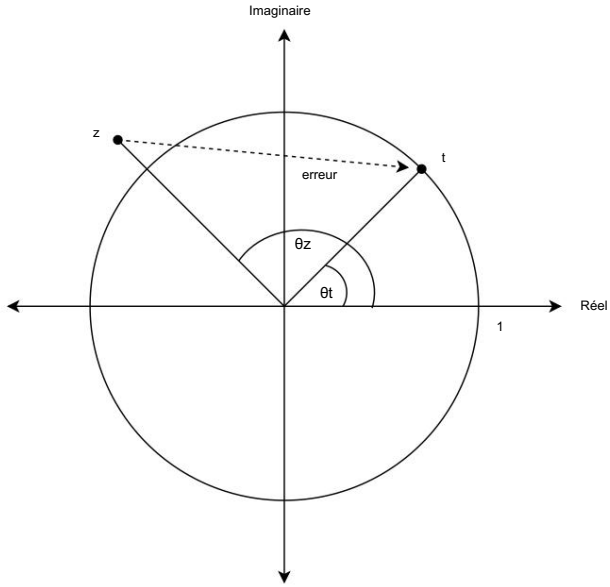


Figure 4. Algorithme d'apprentissage pour CVNN.

$$t = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn \tag{4}$$

L'erreur par rapport à l'objectif d'entraînement t est e = t − z , comme le montre l'équation (5).

$$e = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn - \sum n\ (Wn)\cdot Xn = \sum n\ (\Delta Wn)\cdot Xn \tag{5}$$

Pour simplifier et accélérer le calcul de l'erreur par rapport aux changements de poids, en supposant que chaque nœud contribue de manière égale à l'erreur, le symbole de sommation σ est supprimé de l'équation et les deux côtés sont divisés par le nombre de nœuds contributeurs N dans le complexe. réseau neuronal valorisé pour plus de commodité de calcul. L' équation résultante est l'équation (6).

$$\Delta Wn \cdot Xn = \frac{e}{N} \tag{6}$$

Pour obtenir ΔWn afin de modifier les poids, multipliez les deux côtés de l'équation (6) par Xn X_n^{-1}. X_n^{-1} lorsqu'il est multiplié par le conjugué complexe Xn, n étant à la fois le numérateur et le dénominateur ; donc $X_n^{-1} = \frac{\overline{Xn}}{|Xn|^2}$ où |Xn| = 1 pour Xn dans l'unité cercle. Donc $X_n^{-1} = \overline{Xn}$, et l'équation (6) est à nouveau dérivée des équations (7) et (8).

$$\Delta Wn \cdot Xn \cdot X_n^{-1} = \frac{e}{N} \cdot X_n^{-1} = \frac{e}{N} \cdot \overline{Xn} \tag{7}$$

$$\Delta Wn = \frac{e}{N} \cdot \overline{Xn} \tag{8}$$

De cette manière, le changement de poids obtenu peut être observé dans l'équation (8). Ce changement représente l'ajustement de poids complexes pour chaque nœud contribuant à l' erreur par rapport à l'objectif de formation et est appliqué uniformément sur l'ensemble du réseau.
Grâce à ce processus, les réseaux neuronaux à valeurs complexes s'ajustent au plus près de la cible en utilisant des fonctions d'activation dépendant de la phase et des algorithmes d'apprentissage efficaces tout en gérant des informations riches grâce à des opérations de multiplication complexes entre les entrées et les poids [13].

Rétropropagation de domaine complexe : lors de l'utilisation de couches cachées, l'erreur de la couche de sortie est rétropropagée aux couches cachées pour calculer la quantité de chaque nœud

Machine Translated by Google

dans les couches cachées ont contribué à cette erreur. Sur cette base, les pondérations entre les couches cachées et de sortie doivent être ajustées de manière appropriée. Ce processus est appelé rétropropagation des erreurs, grâce auquel le réseau neuronal peut ajuster les poids pour minimiser l' erreur dans les valeurs de sortie pendant l'apprentissage. La structure d'un réseau neuronal multicouche à valeurs complexes est illustrée à la figure 5.

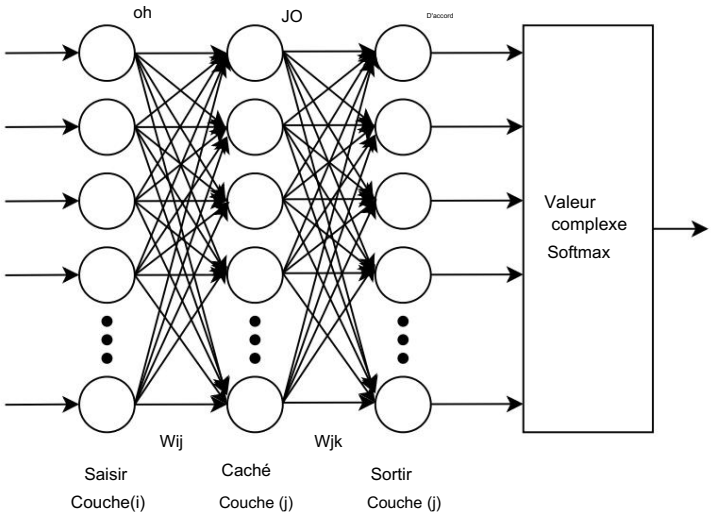


Figure 5. CVNN multicouche.

Dans cet article, une méthode de correction d'erreurs est utilisée pour la couche de sortie k afin de mettre à jour les poids, tandis qu'une méthode de rétropropagation des erreurs est utilisée pour la couche cachée j afin d'examiner son influence sur la sortie. En d'autres termes, la couche de sortie k utilise la méthode de correction d'erreurs pour éviter de tomber dans les minima locaux, tandis que la méthode de rétropropagation des erreurs est appliquée à la couche cachée j pour assurer une meilleure répartition des erreurs de la couche de sortie vers la couche cachée. Cette combinaison de rétropropagation des erreurs dans la couche cachée et de correction des erreurs dans la couche de sortie devrait améliorer le problème du blocage de l'ensemble du réseau neuronal dans les minima locaux tout en permettant une convergence plus rapid

La méthode de rétropropagation des erreurs pour les réseaux de neurones à valeurs complexes est la suivante.

Lors de l'utilisation de la descente de gradient pour les mises à jour de poids dans des réseaux neuronaux à valeurs complexes, le calcul de Wirtinger est utilisé pour différencier des fonctions complexes. Comme les fonctions complexes comprennent des parties réelles et imaginaires, le calcul de Wirtinger effectue une différenciation séparément pour les parties réelles et imaginaires. Pour un nombre complexe z = x + jy défini avec des parties réelles et imaginaires x et y, respectivement, et une fonction complexe f(z) = u(x, y) + jv(x, y), les dérivées de Wirtinger sont définies comme suit [14].

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial f}{\partial x} - j\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial u}\frac{\partial v}{\partial y} + j - j\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial y}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial f}{\partial x} + j\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial y} + j + j\frac{\partial x}{\partial x}\right) - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (dix)$$

$$+ \frac{\partial z}{\partial z}\frac{\partial f}{\partial \bar{z}}\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} df = \quad (11)$$

Dans ce contexte, $\bar{z}$ désigne le conjugué complexe de z. Dans la méthode dérivée de Wirtinger, les fonctions complexes peuvent être traitées comme des extensions de fonctions réelles en les divisant en parties réelles et imaginaires pour les différencier. Ce qui suit décrit le processus de mise à jour de variables complexes à l'aide de la taille de pas α/2 et de la fonction de perte L.

Machine Translated by Google

$$xn+1 = xn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial x} \quad (12)$$

$$yn+1 = yn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial y} \quad (13)$$

En remplaçant zn+1 = xn+1 + j yn+1 dans les équations (12) et (13) , puis en substituant la dérivée de Wirtinger à la fin du processus de dérivation, elle devient la suivante.

$$zn+1 = xn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial x} + j\, yn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial x} + jyn - j\, \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn + jyn - \frac{\alpha}{2} \frac{\partial L}{\partial x} \frac{\partial L}{\partial y} + j \frac{\partial L}{\partial x}$$

$$1 = zn - \alpha 2 - \frac{\partial L}{\partial x} \frac{\partial L}{\partial y} + j \frac{\partial L}{\partial x}$$

$$= zn - \alpha\, \partial z \frac{\partial L}{\partial \bar{z}} \quad (14)$$

La dérivée partielle de L par rapport au complexe conjugué en tant que dérivée $\frac{\partial L}{\partial \bar{z}}$ c'est en rapport avec conjuguée de Wirtinger. Cela montre comment la dérivée conjuguée de Wirtinger peut être utilisée pour simplifier la formule de mise à jour pour les variables complexes. En termes d'utilisation de la méthode ci-dessus, la réécriture de l'équation (5) en tant qu'erreur de couche de sortie donne l'équation (15), où tk représente la valeur cible et ok représente la valeur de sortie réelle de la couche de sortie k.

$$ek = tk - ok \quad (15)$$

Et la fonction de perte est définie comme l'équation (16).

$$L = e\, k^2 = |tk - ok|\overline{|tk - ok|} \quad (16)$$

Si les poids sont importants, l'erreur est plus susceptible de se propager aux couches cachées. L'erreur de couche cachée ej peut être exprimée par l'équation suivante.

$$ej = WT_{jk} \cdot ek \quad (17)$$

En utilisant le résultat de l'équation (14), le gradient de la fonction d'erreur par rapport au poids Wij entre la couche d'entrée i et la couche cachée j peut être exprimé comme suit. Ici, oi est la valeur de sortie de la couche d'entrée i et oj est la valeur de sortie de la couche cachée j.

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{W}ij} = \frac{\partial L}{\partial \bar{o}j} \cdot \frac{\partial \bar{o}j}{\partial \bar{W}ij} \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{W}ij} - ej \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{W}ij} P \sum \bar{W}ij \cdot \bar{o}i = \bar{} \quad (19)$$

Machine Translated by Google

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = -ej \cdot P' \cdot \bar{oi} \quad (20)$$

Dans les équations (19) et (20), P représente la fonction d'activation dépendante de la phase utilisée dans la sortie de la couche cachée, et P' est la dérivée de la fonction d'activation dépendante. La mise à jour des poids de la couche cachée peut être exprimée comme suit.

$$\text{nouveau } Wij = \text{ancien } Wij - lr \cdot \frac{\partial L}{\partial Wij} \quad (21)$$

Lorsqu'il s'agit de variables complexes, il est nécessaire d'utiliser $\frac{\partial L}{\partial Wij}$ à la place de $\frac{\partial L}{\partial Wij}$ pour la mise à jour. Ici, lr joue un rôle dans l'ajustement de l'intensité du changement pour éviter les dépassements, et on l'appelle taux d'apprentissage. De plus, la dérivée de la fonction d'activation P est une fonction complexe, et pour trouver la dérivée d'une fonction complexe, la dérivée de Wirtinger est utilisée [15].

Softmax à valeurs complexes : la fonction softmax, qui est utilisée comme fonction d'activation dans la couche de sortie, prend les valeurs d'entrée et normalise chaque valeur entre 0 et 1. Elle garantit que la somme des valeurs normalisées est toujours 1. Cette fonction permet d'interpréter les résultats sous forme de probabilités. Cela peut être exprimé par l'équation (22).

$$\text{Donc } f\,tmax(Z)i = e\,Zi \sum_{i=1} \frac{e^{Zi}}{n} \quad (22)$$

Cependant, la fonction softmax ne peut interpréter les résultats que sous forme de probabilités pour les entrées de nombres réels, et pour les entrées de nombres complexes, une méthode d'interprétation différente est nécessaire. Dans cet article, nous proposons une méthode d'interprétation softmax à valeurs complexes pour les entrées de nombres complexes. Le résultat de la fonction softmax pour les entrées de nombres complexes produit des valeurs de sortie complexes, et puisque la somme de toutes les valeurs de sortie est 1+0j, nous proposons un algorithme qui calcule la distance entre les valeurs de sortie et 1 + 0j dans le plan complexe et sélectionne l'indice de la valeur la plus proche. Cela peut être exprimé par l'équation (24).

$$\text{distancei} = |So\,f\,tmax(Z)i - \omega| \quad (23)$$

$$\text{index_le plus proche} = \text{argmin (distancei)} \quad (24)$$

Ici, ω = 1 + 0j est défini. Par conséquent, nous décidons de classer le nombre complexe correspondant à close_index en tant que classe 1.

5. Analyse des performances

Dans nos expériences de reconnaissance des signaux vocaux, une comparaison détaillée entre les résultats des réseaux de neurones à valeur réelle et des réseaux de neurones à valeurs complexes a été réalisée. L'analyse des performances a été réalisée parallèlement au prétraitement des coefficients cepstraux de fréquence de Mel (MFCC) à valeurs complexes pour la réduction de la dimensionnalité. De plus, l' impact des MFCC à valeurs complexes sur les résultats de la reconnaissance vocale a été observé. Plus précisément, lors de la reconnaissance de signaux vocaux donnés à l'aide de réseaux neuronaux, l'influence des valeurs MFCC et leur effet de complexification sur les performances du modèle ont été évaluées et comparées afin de déterminer s'il est possible d'améliorer les performances tout en réduisant le nombre de paramètres.

Méthode expérimentale : la figure 6 représente l'architecture d'un réseau neuronal multicouche à valeurs complexes utilisé pour la formation et les tests avec un ensemble de données composé de 8 000 échantillons de parole courts, chacun contenant huit mots différents et durant moins d'une seconde. Les données vocales utilisées dans cette étude font partie de l'ensemble de données de commandes vocales collectées par Google et distribuées sous la licence CC BY.

Machine Translated by Google

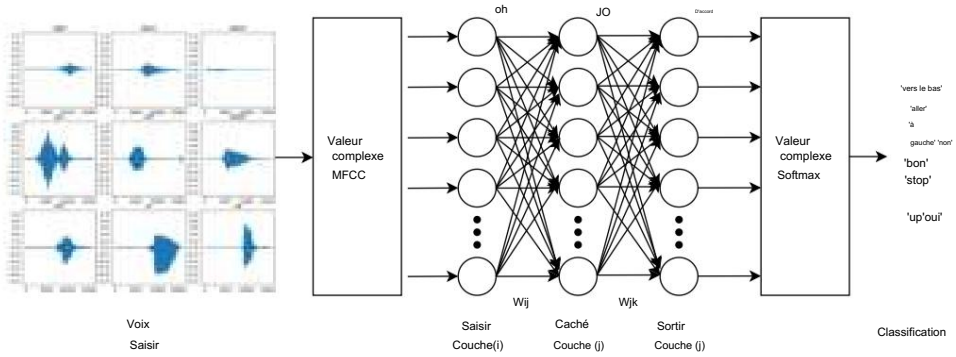


Figure 6. Configuration expérimentale de CVNN multicouche.

Les réseaux de neurones à valeurs complexes sont structurellement similaires aux réseaux de neurones à valeurs réelles, mais la différence réside dans l'utilisation de nombres complexes, qui introduit des changements de phase lorsque la somme des produits entre les entrées et les poids tourne dans le plan complexe. Ces changements de phase jouent un rôle important dans les réseaux de neurones à valeurs complexes. Le réseau neuronal à valeurs complexes se compose d'une couche d'entrée avec des MFCC à valeurs complexes de dimension réduite obtenus à partir des données vocales via le processus de complexification illustré à la figure 3, une couche cachée avec 500 nœuds et une couche de sortie avec 8 nœuds pour classification. Tous les nœuds et poids utilisent des nombres complexes. Les résultats finaux ont été classés au niveau de la couche de sortie. L'ensemble de données comprenait 7 000 échantillons pour la formation et 1 000 échantillons pour les tests. Des clips audio de huit mots ont été utilisés comme données et des expériences ont été menées en divisant les données d'entrée selon que la transformation MFCC à valeurs complexes était appliquée ou non. Dans le cas de l'utilisation de MFCC à valeur réelle, un réseau neuronal à valeur réelle a été utilisé, tandis qu'un réseau neuronal à valeur complexe a été utilisé avec des MFCC à valeur complexe. Les réseaux neuronaux à valeur réelle et à valeur complexe ont été formés dans les mêmes conditions : lr = 0,01, taille du lot = 50 et nombre d'époques = 50. Pour les données d'entrée, les résultats de trois étapes de pré-traitement de réduction de dimensionnalité différentes ont été comparés au réseau neuronal à valeur réelle. Ces étapes de prétraitement comprenaient les dimensions MFCC de 20, 10 et 5. La longueur du signal d'entrée pour le réseau neuronal peut être déterminée comme indiqué dans l'équation (25). Plus précisément, le signal vocal d'entrée a été divisé en 32 trames et des MFCC ont été générés pour chaque trame.

$$\text{La longueur des données du signal d'entrée} = \text{MFCC} \times \text{trames} \tag{25}$$

Par exemple, dans le cas du MFCC 20 à valeur complexe, le MFCC 40 à valeur réelle est calculé en premier. En utilisant l'équation (25), la longueur du signal d'entrée pour le MFCC 40 à valeur réelle devient 40 × 32 = 1280. Si nous convertissons ensuite ces 40 MFCC en nombres complexes, comme illustré sur la figure 3, la réduction de dimensionnalité est obtenue à la moitié de la longueur. , ce qui donne 16 images. Par conséquent, la longueur du signal d'entrée devient 40 × 16 = 640, ce qui équivaut à la longueur du signal d'entrée du MFCC 20 à valeur réelle. Une réduction de dimensionnalité similaire peut être effectuée pour le MFCC 10 à valeur complexe et le MFCC 5 à valeur complexe en utilisant le même procédé. . Le nombre total de paramètres pour l'ensemble du réseau neuronal obtenu grâce à ce processus est présenté dans le tableau 1. Dans ce tableau, I(n) représente le nombre de neurones dans la couche d'entrée, H(n) représente le nombre de neurones dans la couche cachée. couche, et O(n) représente le nombre de neurones dans la couche de sortie.

Tableau 1. Nombre total de paramètres dans le réseau neuronal.

MFCC	MFCC à valeur réelle	MFCC à valeur complexe
20	I(20 × 32 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324 000	I(40 × 16 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324 000
10	I(10 × 32 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164 000	I(20 × 16 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164 000
5	I(5 × 32 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84 000	I(10 × 16 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84 000

Machine Translated by Google

MFCC 20 à valeur complexe par rapport au MFCC 20 à valeur réelle : comme le montre la figure 7, le MFCC 20 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 99,40 % et une précision de test de 84,90 % malgré la même longueur de données d'entrée que la valeur réelle. MFCC 20, qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 98,13 % et une précision de test de 83,10 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

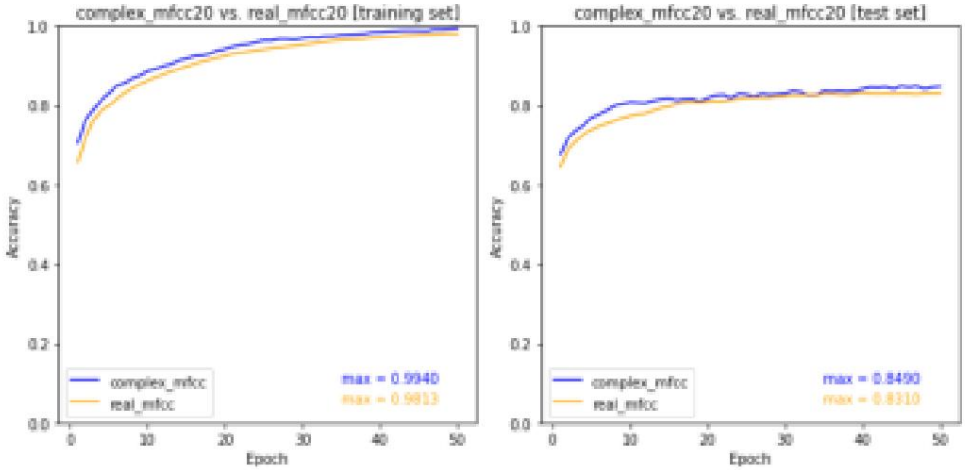


Figure 7. Comparaison des résultats du MFCC 20 à valeur complexe et du MFCC 20 à valeur réelle.

MFCC 10 à valeur complexe par rapport au MFCC 10 à valeur réelle : comme le montre la figure 8, MFCC 10 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 96,90 % et une précision de test de 83,80 % malgré la même longueur de données d'entrée que la valeur réelle. MFCC 10, qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 94,24 % et une précision de test de 81,20 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

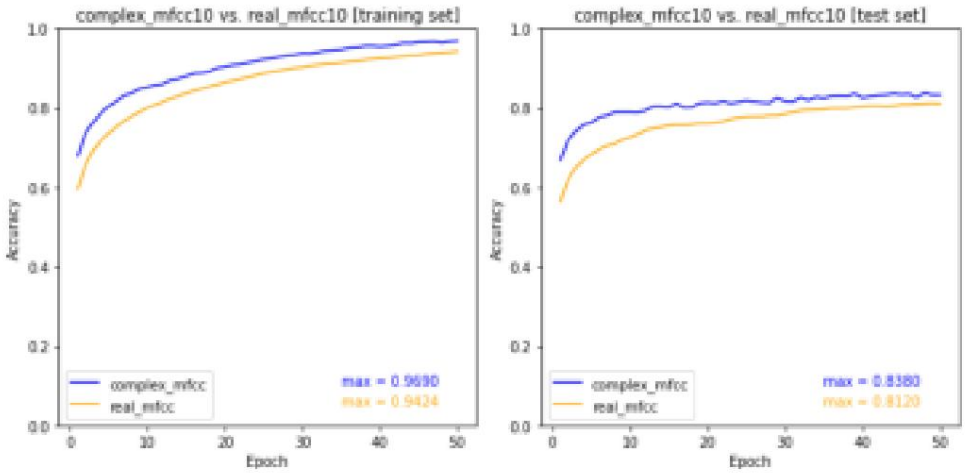


Figure 8. Comparaison des résultats du MFCC 10 à valeur complexe et du MFCC 10 à valeur réelle.

MFCC5 à valeur complexe par rapport à MFCC5 à valeur réelle : comme le montre la figure 9, MFCC 5 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 92,33 % et une précision de test de 81,40 % malgré la même longueur de données d'entrée que MFCC 5 à valeur réelle. , qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 86,34 % et une précision de test de 74,90 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

Machine Translated by Google

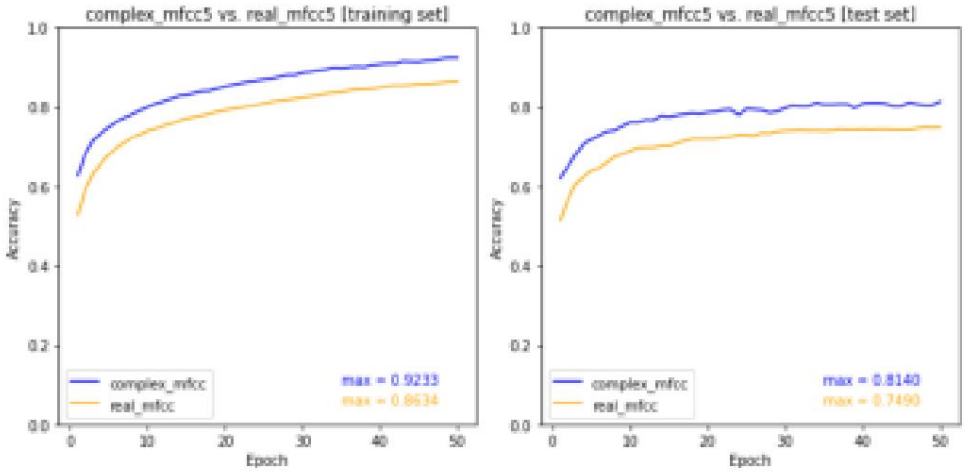


Figure 9. Comparaison des résultats du MFCC 5 à valeur complexe et du MFCC 5 à valeur réelle.

Résultats globaux de l'analyse : après examen des résultats expérimentaux, il a été observé que l'utilisation de MFCC à valeurs complexes donne des performances supérieures à celles de l'utilisation de MFCC à valeur réelle, même avec la même longueur de données d'entrée. Par conséquent, il a été confirmé que l'utilisation de MFCC et de réseaux neuronaux à valeurs complexes conduit à de meilleurs résultats. La variation de précision en fonction du nombre de fonctionnalités MFCC est illustrée dans la figure 10. Bien que cela ne soit pas présenté ici, les mêmes résultats ont été obtenus en utilisant le score F1.

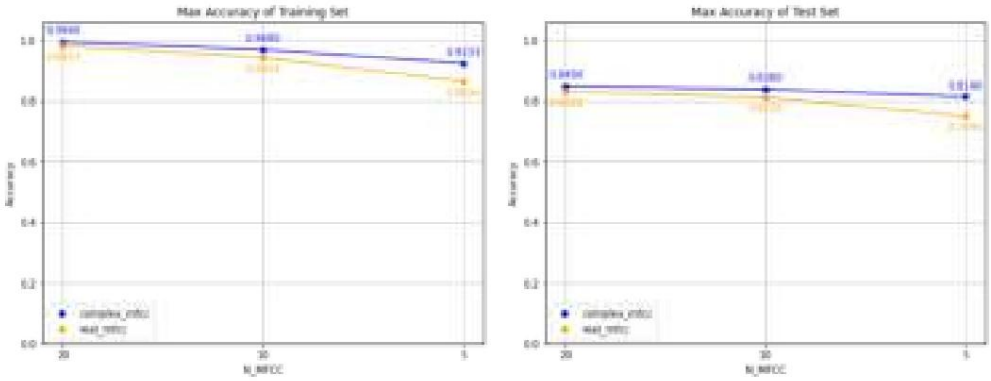


Figure 10. Variation de précision en fonction du nombre de MFCC.

S'il existe un nombre suffisant de MFCC, avec des époques croissantes, il apparaît que les performances utilisant des nombres réels commencent à converger vers celles utilisant des nombres complexes. Cependant, la figure 9 montre un résultat différent. Le MFCC 5 à valeur complexe possède 5 MFCC complexes dimensionnellement réduits obtenus à partir de 10 MFCC grâce au processus de complexification illustré à la figure 3. Un MFCC 5 à valeur réelle avec seulement 5 MFCC ne peut pas rattraper le MFCC 5 à valeur complexe même si les époques augmentent. . En d'autres termes, lorsque le nombre de MFCC est faible, même si les époques augmentent, les résultats des MFCC à valeur réelle ne correspondent pas aux performances des MFCC à valeur complexe. Comme le montre la figure 10, malgré le même nombre de paramètres, les résultats du MFCC 5 à valeur complexe sont supérieurs à ceux du MFCC 5 à valeur réelle. Par conséquent, il a été observé que lors de l'utilisation de MFCC à valeurs complexes, le changement de précision à mesure que le nombre de fonctionnalités MFCC diminue, c'est plus fluide que lors de l'utilisation de MFCC à valeur réelle.

6. Conclusions

Dans cet article, nous avons introduit des réseaux de neurones à valeurs complexes pour résoudre le problème de la reconnaissance vocale. Nos expériences ont utilisé des MFCC à valeurs complexes comme entrées pour un

Machine Translated by Google

réseau neuronal à valeurs complexes. Les résultats ont démontré des performances supérieures lors de l'utilisation de MFCC à valeur complexe, avec un changement de précision plus progressif à mesure que le nombre de fonctionnalités MFCC diminuait, par rapport à l'utilisation de MFCC à valeur réelle. Cela suggère que les MFCC aux valeurs complexes peuvent aider à maintenir les performances avec moins de fonctionnalités. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur le potentiel des réseaux neuronaux à valeurs complexes et démontrent l'efficacité de la combinaison de MFCC à valeurs complexes avec des réseaux neuronaux à valeurs complexes dans la reconnaissance vocale.

Malgré ces résultats prometteurs, nous reconnaissons certaines limites de notre approche . Cette étude a été menée sur un ensemble de données limité, qui ne représente peut-être pas pleinement la diversité des modèles de parole du monde réel. De plus, l'architecture du réseau neuronal complexe décrite dans cette étude est relativement simple et peut ne pas capturer toutes les subtilités des signaux vocaux.

Pour l'avenir, nous souhaitons nous appuyer sur ces travaux pour améliorer encore la précision et les performances des modèles de traitement et de reconnaissance des signaux vocaux. Nos futures recherches se concentreront sur la conception de modèles de réseaux neuronaux à valeurs complexes plus sophistiqués et sur la réalisation d'expériences sur divers ensembles de données pour améliorer les performances. De plus, nous prévoyons d'explorer l'application des réseaux neuronaux à valeurs complexes à d'autres domaines au-delà de la reconnaissance vocale, en élargissant potentiellement leur utilisation dans divers domaines du traitement du signal (16).

Contributions des auteurs : Conceptualisation, SK ; administration de projet, député; supervision, député; rédaction – ébauche originale, SK Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été soutenu conjointement par la Fondation nationale de recherche de Corée (NRF) via une subvention fournie par le gouvernement coréen (MSIT) (subvention n° NRF-2023R1A2C1005461) et par le MSIT (Ministère des sciences et des TIC) de Corée. , dans le cadre du programme de soutien aux entreprises Convergence Security Core Talent Training (IITP-2024-RS-2024-00426853) supervisé par l'IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

Déclaration de disponibilité des données : les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l' article. Des demandes complémentaires peuvent être adressées aux auteurs correspondants.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Tebelskis, J. Reconnaissance vocale à l'aide de réseaux de neurones. doctorat Thèse, École d'informatique, Université Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, États-Unis, 1995.
2. Sarroff, AM Réseaux de neurones complexes pour l'audio. doctorat Thèse, Dartmouth College, Hanover, NH, États-Unis, 2018.
3. Abdul, ZK ; Al-Talabani, AK Mel Frequency Cepstral Coefficient et ses applications : une revue. Accès IEEE 2022, 10, 122136-122158. [Référence croisée]
4. Barrachina, JA; Ren, C. ; Vieillard, G. ; Morisseau, C. ; Ovarlez, JP Théorie et mise en œuvre de neurones à valeur complexe Réseaux. arXiv 2023, arXiv :2302.08286.
5. Aizenberg, I. Réseaux de neurones à valeurs complexes avec neurones à valeurs multiples ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016.
6. Graves, A. ; Jaitly, N. ; Mohamed, AR Reconnaissance vocale hybride avec Deep Bidirectionnel LSTM. Dans Actes de l'atelier IEEE 2013 sur la reconnaissance et la compréhension automatiques de la parole, Olomouc, République tchèque, 8-12 décembre 2013 ; pp. 273-278. [Référence croisée]
7. Paz, P. ; Garrido, M. Implémentation efficace de multiplicateurs complexes sur des FPGA à l'aide de tranches DSP. J. Processus de signal. Système. 2023, 95, 543-550. [Référence croisée]
8. Ahmad, M. ; Zhang, L. ; Chowdhury, MEH Implémentation FPGA d'un réseau neuronal à valeur complexe pour les représentations polaires Classement des images. Capteurs 2024, 23, 2627. [CrossRef] [Pub Med]
9. Anggraeni, D. ; Sanjaya, Wisconsin ; Nurasyidiek, MON ; Munawwaroh, M. La mise en œuvre de la reconnaissance vocale à l'aide des coefficients de cepstre à fréquence Mel (MFCC) et de la méthode de machine à vecteurs de support (SVM) basée sur Python pour contrôler le bras du robot. IOP Conf. Ser. Maître. Sci. Ing. 2018, 288, 012042. [Réf. croisée]
10. Dhanjal, AS ; Singh, W. Une enquête complète sur la reconnaissance automatique de la parole à l'aide des réseaux de neurones ; Springer Nature : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2023.
11. Smith, SW Le guide du scientifique et de l'ingénieur sur le traitement du signal numérique, 2e éd.; Édition technique de Californie : San Diego, Californie, États-Unis, 1999 ; pp. 557-558.
12. Bassey, J. ; Li, X. ; Qian, L. Une enquête sur les réseaux de neurones à valeur complexe. arXiv 2021, arXiv :2101.12249v1.
13. MYONeuralNet. Réseaux de neurones à valeur complexe – Expériences. 2016. Disponible en ligne : http://makeyourownneuralnetwork. blogspot.com/2016/05/complex-valued-neural-networks.html (consulté le 19 février 2021).

Machine Translated by Google

14. Fischer, R. Wirtinger Calcul. Dans Précodage et mise en forme du signal pour la transmission numérique ; John Wiley & Sons, Inc. : Hoboken, NJ, États-Unis, 2002 ; pp. 405-413.
15. PyTorch. Package de différenciation automatique —torch.autograd, sd Disponible en ligne : https://pytorch.org/docs/stable/notes/autograd.html (consulté le 3 novembre 2023).
16. Lee, C. ; Hasegawa, H. ; Gao, S. Réseaux de neurones à valeur complexe : une enquête complète. IEEE/CAA J.Autom. Péché. 2022, 9, 1433-1454. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Recommandations d'emploi : analyse comparative du filtrage collaboratif Méthodes pour les petites annonces

Robert Kwieci'nski 1,2, Tomasz Górecki 2,*, Agata Filipowska 3 et Viacheslav Dubrov 1

1 Groupe OLX, Królowej Jadwigi 43, 61-872 Pozna 'n, Pologne ; r.kwiecinskipl@gmail.com (RK) ; slavadubrov@gmail.com (VD)
2 Faculté de mathématiques et d'informatique, Université Adam Mickiewicz, Uniwersytetu Pozna ´nskiego 4, 61-614 Pozna ´n, Pologne
3 Département des systèmes d'information, Université d'économie et de commerce de Pozna ´n, Al. Niepodległo´sci 10, 61-875 Pozna ´n, Pologne ; agata.filipowska@ue.poznan.pl
* Correspondance : tomasz.gorecki@amu.edu.pl

Résumé : Les petites annonces posent de nombreux défis aux méthodes de recommandation, notamment la visibilité temporaire des publicités, l'anonymat de la plupart des utilisateurs et le fait qu'un seul utilisateur peut généralement consommer un article annoncé. Dans ce travail, nous abordons ces défis en choisissant des modèles et des procédures d'évaluation considérés comme précis, diversifiés et efficaces (en termes de mémoire et de consommation de temps lors de l'entraînement et de la prédiction). Cet article vise à comparer diverses méthodes de recommandation pour les annonces d'emploi, en utilisant OLX Jobs comme exemple, afin d'améliorer le taux de conversion des annonces et la satisfaction des utilisateurs. Dans notre recherche, nous mettons en œuvre des méthodes évolutives et représentons différentes approches des recommandations : Alternating Least Square (ALS), LightFM, Prod2Vec, RP3Beta et Sparse Linear Methods (SLIM). Nous avons effectué des tests A/B en envoyant des millions de messages contenant des recommandations pour effectuer des évaluations en ligne des méthodes sélectionnées. De plus, nous avons publié l'ensemble de données créé pour notre recherche. À notre connaissance, il s'agit du premier ensemble de données de ce type. Il contient 65 502 201 événements effectués sur OLX Jobs par 3 295 942 utilisateurs qui ont interagi avec (affichés, répondu ou ajoutés à leurs favoris) 185 395 offres d'emploi sur deux semaines en 2020. Nous démontrons que RP3Beta, SLIM et ALS fonctionnent nettement mieux que Prod2Vec et LightFM lorsqu'ils sont testés. dans un cadre de laboratoire. Les tests A/B en ligne montrent également que l'envoi de messages contenant des recommandations générées par les modèles ALS et RP3Beta augmente le nombre d'utilisateurs contactant les annonceurs. De plus, RP3Beta a eu un impact 20 % plus significatif sur cette métrique que

Mots clés : recommandations d'emploi ; petites annonces; filtrage collaboratif ; tests d'évolutivité ; Tests A/B ; systèmes de recommandation ; factorisation matricielle; systèmes de recommandation basés sur des graphiques ; Ensemble de données sur les interactions professionnelles OLX ; mesures de diversité

check for updates

Citation : Kwieci 'nski, R. ; Gorecki, T. ; Filipowska, A. ; Dubrov, V. Recommandations d'emploi : analyse comparative des méthodes de filtrage collaboratif pour Petites annonces. Électronique 2024, 13, 3049. https://doi.org/10.3390/électronique13153049

Rédacteurs académiques : Marco Lombardi, Domenico Santaniello, Zilu Liang et Mohammed Khan

Reçu : 30 mai 2024
Révisé : 24 juillet 2024
Accepté : 27 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les petites annonces en ligne sont des sites Web sur lesquels les annonceurs publient des annonces concernant la vente ou la location de services ou de produits [1]. Cet article aborde la publicité en ligne en utilisant l' exemple d'OLX Jobs.

Les petites annonces s'efforcent de répondre aux besoins des annonceurs et des répondants aux publicités en ligne. Pour correspondre à ces groupes, de meilleures méthodes de recommandation deviennent de plus en plus essentielles. Par rapport au commerce électronique traditionnel (par exemple, Amazon (https://www.amazon.com/, consulté le 26 juin 2024) ou eBay (https://www.ebay.com/, consulté le 26 juin 2024)), les petites annonces doivent faire face à différents défis, que nous abordons dans notre procédure d'évaluation. L'une est la visibilité temporelle des publicités, que nous avons décidé de résoudre en reformant fréquemment le modèle. Par conséquent, l'efficacité du modèle, dont nous rendons compte, est essentielle à l'évaluation. Un autre défi est qu'un annonceur n'a généralement besoin que d'un seul utilisateur pour finaliser la transaction.
Cet aspect a été abordé en incluant une analyse de la diversité dans notre évaluation.

Machine Translated by Google

Dans nos recherches, nous nous concentrons sur les approches issues du filtrage collaboratif. Les modèles de filtrage collaboratif ont prouvé leur précision, même s'ils n'utilisent pas d'informations supplémentaires sur les utilisateurs ou les éléments, parfois difficiles à obtenir ou à traiter en pratique. Cet article vise à évaluer différentes méthodes de recommandation à utiliser dans le secteur des petites annonces. La grande rareté de notre ensemble de données, ainsi que le nombre important d'annonces et d'utilisateurs, contribuent à la complexité du problème de recherche.

Ci-dessous, nous listons nos principales contributions.

• Nous évaluons de manière exhaustive des approches de filtrage diverses, évolutives et collaboratives en laboratoire en termes de précision, de diversité et d'efficacité. Nous évaluons l' exactitude pour différents groupes d'utilisateurs, en fonction du nombre d'éléments avec lesquels ils ont interagi, ainsi que d'une analyse statistique des différences. La méthodologie d'évaluation proposée répond aux enjeux majeurs des petites annonces.

• Nous présentons les résultats de deux tests A/B en ligne démontrant l'impact des modèles ALS et RP3Beta sur les utilisateurs d'OLX. Plus d'un million d'utilisateurs ont participé à chaque test. L'impact rapporté peut être utilisé pour estimer l'importance des systèmes de recommandation dans le domaine des petites annonces et permettre à d'autres entreprises de prendre des décisions plus éclairées concernant le développement de tels modèles. • Nous publions
et présentons un ensemble de données sur les interactions professionnelles. A notre connaissance, c'est le plus grand ensemble de données accessible au public sur les interactions professionnelles.

Cet article comprend sept sections. La section 2 est une revue de la littérature sur les développements sous-jacents. La section 3 décrit l'ensemble de données développé et rendu public sur Kaggle. La conception de l'expérience en laboratoire, ainsi que la mise en œuvre des méthodes, sont décrites dans la section 4. La section 5 se concentre sur les résultats de l'évaluation en laboratoire de nos mises en œuvre ainsi que sur l'importance statistique des résultats. La section 6 présente les résultats des implémentations en ligne effectuées lors des tests A/B avec les utilisateurs, ainsi qu'une discussion des résultats. Les conclusions sont présentées dans la section 7.

2. Travaux connexes

Dans cette section, nous commençons par décrire les caractéristiques uniques des petites annonces et des domaines d'emploi. Nous fournissons ensuite un aperçu des systèmes de recommandation. Nous discutons ensuite des facteurs qui influencent notre sélection de modèles et fournissons une description détaillée de chaque modèle. Enfin, nous précisons les lacunes de la recherche.

2.1. Sites de petites annonces

Les sites de petites annonces (petites annonces) sont des versions en ligne des sections publicitaires des journaux, avec des annonces concernant les véhicules, l'immobilier, l'emploi, les animaux de compagnie, etc. Les petites annonces sont un type particulier de site de commerce électronique, car elles ne prennent pas en charge le finalisation des transactions entre les parties : ils sont plutôt utilisés pour communiquer sur le produit ou le service et pour organiser des réunions pendant que la transaction est effectuée hors ligne ; cela les distingue des sites de commerce électronique traditionnels comme eBay ou Amazon [2].

Nos recherches se concentrent sur OLX, qui est présent dans plus de 30 pays à travers le monde.
L'un des types d'annonces publiées sur les petites annonces est celui des offres d'emploi. Dans nos recherches, nous avons identifié plusieurs caractéristiques qui distinguent les offres d'emploi sur les petites annonces des annonces automobiles ou immobilières, par exemple :

• Les exigences d'une annonce indiquent le type d'utilisateur qui peut répondre à l'annonce, et non tous les utilisateurs possèdent les compétences requises.
• Une implication plus intensive de l'utilisateur pendant le processus de recherche, car trouver un emploi est un besoin primordial par rapport, par exemple, à l'achat d'une voiture. •
Le lieu de travail a un impact considérable sur l'utilisateur : pour acheter un téléphone portable ou une voiture, un utilisateur peut voyager ou utiliser un service de colis pour livrer l'article. Néanmoins, un travail nécessite un déménagement s'il est éloigné du domicile de l'utilisateur.
• D'un point de vue technique, une description de poste comporte de nombreux aspects qualitatifs, et selon le poste, les différences peuvent être importantes même entre les annonces d' une même entreprise.

Machine Translated by Google

En plus de ces caractéristiques, au cours de nos recherches, nous avons également identifié les défis suivants pour les méthodes de recommandation sur les petites annonces qui ont influencé notre mise en œuvre des méthodes :

- Le nombre d'utilisateurs et d'offres : avec OLX Jobs, nous avons traité des millions d'utilisateurs et des dizaines de milliers d'offres, toutes deux en constante évolution. • Un utilisateur n'a pas besoin de créer un profil pour interagir avec les publicités, ce qui signifie que les informations d'un profil ne peuvent pas être utilisées à des fins de recommandation et que les recommandations sont déterminées par le comportement de l'utilisateur lors de la visualisation.
- Une annonce a généralement un nombre limité de visiteurs (interagissant avec l'annonce), car une annonce concerne généralement une offre unique. Une fois le besoin satisfait, l'annonce est désactivée. • Il n'y a aucune information indiquant si une transaction a eu lieu ; sur les petites annonces, la conversion concerne la réception d'une réponse à une annonce publiée, toute transaction étant hors ligne.

Ces défis créent des difficultés non seulement pour la mise en œuvre mais également pour tester l'exactitude des méthodes proposées. Nous avons pris en compte ces défis lors de la préparation de l' ensemble de données et de la mise en œuvre et de l'évaluation des méthodes décrites dans cet article.

2.2. Systèmes de recommandation

Il a été démontré que le problème du surchoix [3] peut diminuer la consommation de produits [4] et réduire les revenus du site [5]. Les fournisseurs peuvent demander à leurs utilisateurs des informations supplémentaires sur leurs attentes concernant les articles afin de réduire le nombre de choix présentés. Même si l'utilisateur est prêt à consacrer du temps à fournir ces informations, le nombre de possibilités est généralement trop important pour être présenté à l'utilisateur. Pour résoudre ce problème, de nombreuses entreprises, comme Netflix [6] et Amazon [7], ont créé des systèmes de recommandations personnalisées dont le rôle est de suggérer des éléments pertinents aux utilisateurs [8].

Les recommandations sont utilisées dans plusieurs domaines, notamment la musique, le tourisme, la mode et l'alimentation. De nombreuses études ont été réalisées dans le domaine du commerce électronique [9], des petites annonces [10] et des recommandations d'emploi [11-13]. Li et coll. [14] ont considérablement amélioré leurs recommandations sur LinkedIn en utilisant l'apprentissage par transfert profond pour créer des modèles de compréhension du travail spécifiques à un domaine. Zhu et coll. [15] ont proposé un modèle de recommandation inter-domaines utilisant un graphique hétérogène et un algorithme de détection de communauté pour recommander des cours et des emplois. Lacic et coll. [16] ont évalué différentes architectures d'encodeurs automatiques pour les recommandations de tâches basées sur les sessions et ont présenté les résultats sur des ensembles de données de recommanda

Généralement, nous distinguons deux approches pour fournir des recommandations : les recommandations basées sur le contenu et le filtrage collaboratif [8].

Dans les recommandations basées sur le contenu [17], nous utilisons des informations sur les utilisateurs (par exemple, passe-temps, éducation, compétences) et sur les articles (par exemple, prix, emplacement, catégorie). Ces systèmes utilisent généralement l'historique des interactions (notes, visites, achats et réponses) d'un seul utilisateur mais ne prennent pas en compte les notes de tous les utilisateurs simultanément.

La collecte/le traitement des informations sur les utilisateurs et les éléments n'est pas toujours réalisable. Dans l' approche de filtrage collaboratif [18,19], nous utilisons uniquement les informations sur les interactions des utilisateurs entre les éléments. Même sans informations sur les fonctionnalités des utilisateurs et des articles, ces systèmes peuvent fournir des recommandations très précises. Nous avons choisi cette approche en raison du manque de fonctionnalités utilisateur et de la difficulté de surpasser le filtrage collaboratif en utilisant les fonctionnalités des éléments dans un environnement de production (nous développons cela dans la section 6.3).

L'une des lacunes les plus importantes du filtrage collaboratif est l'impossibilité de fournir des recommandations concernant les utilisateurs et les éléments sans interactions, connue sous le nom de problème de démarrage à froid [20]. Une solution possible pour réduire ce problème est le recyclage fréquent du modèle. Avec de nombreuses interactions utilisateur, cette stratégie nécessite de se concentrer sur l' évolutivité du modèle [21].

Un autre facteur important déterminant le choix du modèle est le type d'interaction entre un utilisateur et un élément [20]. Nous appelons le feedback explicite lorsque l'utilisateur indique explicitement sa préférence pour l'élément (par exemple, en l'évaluant sur une échelle de 1 à 5). Un autre type est celui des commentaires implicites, lorsque nous pouvons uniquement supposer que la préférence de l'utilisateur pour l'élément est basée sur

Machine Translated by Google

sur le comportement des utilisateurs (par exemple, acheter un article ou regarder un film). Le feedback implicite est moins précis, plus abondant et n'exprime généralement que des préférences favorables [22].

Les évaluations en laboratoire des systèmes de recommandation sont généralement basées sur des mesures de précision [23]. Récemment, une grande attention a été accordée à d'autres aspects, tels que la diversité, l'incertitude, la nouveauté et la couverture [24,25]. Avec les petites annonces, un article ne peut généralement être consommé que par un seul utilisateur, nous devons donc éviter de recommander le même article à un nombre important d'utilisateurs. Par conséquent, il est essentiel de se concentrer sur la couverture du catalogue [26] . L'une des tâches les plus difficiles dans l'évaluation des systèmes de recommandation consiste à trouver la métrique hors ligne la plus corrélée à l'objectif en ligne [27].

Dans cet article, nous évaluons des modèles de filtrage collaboratif pour un ensemble de données de rétroaction implicite important . Nous comparons l'exactitude, la diversité et l'efficacité des méthodes de recommandation sélectionnées en laboratoire, puis prouvons la qualité des méthodes lors de tests en ligne avec les utilisateurs.

2.3. Méthodes de recommandation

Ci-dessous, nous énumérons les aspects les plus importants ayant un impact sur la sélection des méthodes pour notre recherche. • Popularité dans la littérature. Nous avons sélectionné des méthodes dont les performances ont été minutieusement évaluées. Toutes les méthodes sélectionnées, sauf une, ont été citées au moins des centaines de fois.

• Popularité dans l'industrie. L'évaluation de cet aspect s'est révélée difficile car les entreprises partagent rarement les résultats des expériences menées. Certains indicateurs de popularité incluent la disponibilité de la mise en œuvre et le nombre de personnes qui l'utilisent (par exemple, reflété dans le nombre d'étoiles et de fourchettes sur GitHub). Nous avons également pris en compte l'expérience des data scientists travaillant au sein de notre entreprise, qui ont déployé la plupart des méthodes sélectionnées pour d'autres cas d'utilisation dans le passé.

•
Évolutivité. Nous n'avons envisagé que des solutions capables de gérer des millions d'utilisateurs et d'articles. De plus, nous avons réduit le problème de démarrage à froid en réentrainant fréquemment le modèle. Nous avons donc dû choisir des techniques à entraîner sur notre ensemble de données en quelques heures.

• Diversité des approches. Nous souhaitions tester des méthodes représentant différentes « familles » pour évaluer leur applicabilité aux petites annonces. Nous avions prévu d'identifier la famille d'approches la plus prometteuse pour poursuivre les recherches dans cette direction.

Enfin, ALS, LightFM, Prod2Vec, RP3Beta et SLIM ont été sélectionnés pour les tests et l'évaluation . Les sous-sections suivantes décrivent les raisons du choix de chaque méthode spécifique et la définition de la méthode. Une limitation courante de ces méthodes est leur incapacité à recommander des éléments qui ne sont visités par aucun utilisateur et à générer des recommandations pour les utilisateurs qui n'ont visité aucun élément (problème de démarrage à froid, [21]). Avec notre ensemble de données, sans fonctionnalités utilisateur et élément, il est impossible de surmonter ce problème par une méthode personnalisée.

Les méthodes sélectionnées ont déjà été comparées dans différents domaines. Anelli et coll. [28] ont comparé RP3Beta, SLIM, ALS et BPRMF (qui équivaut à LightFM lors de l'utilisation de la fonction de perte BPR) sur trois ensembles de données : Amazon Digital Music, Epinions et MovieLens 1M, en termes de précision, de diversité et d'efficacité. Les nombres d'interactions dans ces ensembles de données sont respectivement de 145 523, 300 475 et 571 531. Notre étude a utilisé un ensemble de données contenant des dizaines de millions d'interactions, similaires à celles des systèmes de production OLX.
De plus, nous fournissons les résultats d'une évaluation en ligne.

Dacrema et coll. [29] ont comparé la précision de SLIM, RP3Beta et ALS sur plusieurs ensembles de données (CiteULike-a, MovieLens 1M, Pinterest, Amazon Music, Amazon Movies, Movie- Lens 20M, Netflix, Yelp et Gowalla). Ils ont montré que chacun de ces algorithmes surpassait les deux autres sur au moins un ensemble de données. Certaines de leurs découvertes ont été confirmées sur les ensembles de données MovieLens 1M et Pinterest par Anelli et al. [30]. Zhu et coll. [31] ont comparé BPRMF, SLIM et Prod2Vec sur trois ensembles de données (Amazon Books, Yelp et Gowalla), montrant la supériorité de SLIM. Dong et coll. [32] ont analysé la précision de RP3Beta, SLIM et ALS sur neuf ensembles de données, SLIM fournissant les meilleurs résultats sur huit ensembles de données et ALS.

Machine Translated by Google

sur une. Contrairement à notre étude, ces articles n'ont pas comparé les méthodes sélectionnées en termes de ni la diversité ni l'efficacité, ni mené d'évaluation en ligne.

Récemment, plusieurs méthodes de recommandation basées sur les réseaux de neurones ont été proposé. Il a été démontré que des modèles simples correctement déterminés et réglés les surpasser [28,31-33]. De plus, en raison de la complexité informatique, les modèles basés sur les réseaux de neurones sont moins fréquemment testés sur des ensembles de données contenant des dizaines de millions de interactions [28]. Nous laissons donc aux recherches futures le soin de proposer des solutions plus avancées et des méthodes évolutives qui fournissent des résultats supérieurs sur notre ensemble de données.

2.3.1. Modèles de factorisation matricielle

Les techniques de factorisation matricielle ont été utilisées avec succès dans les systèmes de recommandation depuis le concours Netflix Prize [34]. L'idée principale est de se rapprocher du parc clairsemé matrice d'interaction utilisateur-élément comme produit de deux matrices plus petites et denses. Nous évaluons deux approches de factorisation matricielle : LightFM et ALS.

Le modèle LightFM [35] a été proposé pour surmonter le problème de démarrage à froid des méthodes de factorisation matricielle. Dans notre cas, cela se réduit à une factorisation matricielle classique sans informations sur les utilisateurs et les éléments. Malgré cela, nous avons décidé d'utiliser cette approche en raison de sa mise en œuvre officielle efficace dans la prise en charge de multiples fonctions de perte : logistique, BPR [36], WARP [37] et -OS WARP [38].

Soit U un ensemble d'utilisateurs et I un ensemble d'éléments. Pour un utilisateur U et un élément I donnés, nous définir = 1 si l'utilisateur interagit avec l'élément prédit , et = 0, sinon. Le modèle LightFM le score comme suit :

$$\hat{} = \cdot + + ,$$

où et désignent les représentations latentes dimensionnelles de l'utilisateur et de l'élément, et et sont les biais de l'utilisateur et de l'élément. Tous ces paramètres sont appris au cours la formation.

La fonction de perte logistique doit être utilisée lorsque des commentaires positifs et négatifs types sont disponibles, ils sont donc inappropriés pour notre ensemble de données, ce que nous avons confirmé expérimentalement lors du réglage des hyperparamètres.

Les fonctions de perte BPR, WARP et -OS WARP sont des approches d'apprentissage par paire qui sont plus pertinentes pour notre tâche de recommandations principales. Ils essaient de modifier paramètres du modèle pour maximiser la différence entre les scores des items D avec avec lequel l'utilisateur interagit et des éléments D avec lesquels l'utilisateur n'interagit pas.

Plus précisément, dans la fonction de perte BPR [36], nous essayons de maximiser l'expression, comme suit:

$$\sum_{(,,)\ S} \ln (\hat{} \quad - \hat{}) - \Theta ||\Theta||2 ,$$

où

$$S = \{(, ,)| \quad U, \quad D \text{ et } \quad D \},$$

$$( ) = \frac{1}{1 + -} ,$$

Θ est un paramètre de régularisation spécifique au modèle, Θ est un vecteur de paramètres et || · || est le Norme euclidienne.

Nous présentons WARP [37] comme un cas de -OS WARP [38]. La fonction de perte -OS WARP est une somme de pertes pour chaque utilisateur :

$$\sum_{U} (\hat{} , D),$$

où ˆ est un vecteur de scores estimés ˆ pour chaque élément I.

Machine Translated by Google

Pour un utilisateur donné, , nous classons les éléments en interaction D par ordre décroissant du scores estimés. À savoir, nous classons les éléments comme 1, 2, . . . , | D | , où les indices sont choisi de telle sorte qu'on ait ce qui suit :

$$\hat{}_{1} \geq \hat{}_{2} \geq \ldots \geq \hat{}_{|D|} .$$

Ensuite nous avons le suivant:

$$(\hat{} , ré) = \frac{1}{} \sum_{=1}^{| D |} ( )\Phi(\text{rang} (\hat{})),$$

où rang (ˆ) = I\D (1 + ˆ ≥ ˆ), est une fonction indicatrice, Φ( ) = $\sum_{=1}^{} \frac{1}{}$, et = $\sum_{=1}^{| D |}$ ( ) normalise les poids induits par .

En pratique, on échantillonne un item positif concernant la fonction de pondération et choisissez au hasard des éléments invisibles jusqu'à ce que, après les échantillonnages, 1 + ˆ ≥ ˆ . Ensuite, nous effectuons une pas de gradient pour minimiser Φ($\frac{\text{I\D |}}{}$) (1 − + ˆ).

Enfin, la perte -OS WARP est obtenue pour ( ) = 1 et ( ) = 0 si ≠ . La chaîne la perte est obtenue lorsque nous définissons ( ) = 1 pour N. Nous pouvons ignorer la commande des éléments positifs de D pour simplifier les calculs.

Dans notre recherche, toutes les fonctions de perte (logistique, BPR, WARP et -OS WARP) ont été traitées comme hyperparamètres du modèle LightFM et optimisés lors de l'entraînement.

Le modèle ALS (moindres carrés alternés), également connu sous le nom de WRMF – factorisation matricielle régularisée pondérée [39], est un exemple de méthode de factorisation matricielle conçue pour pour les ensembles de données de rétroaction implicite. Nous avons choisi cette méthode en raison de ses performances éprouvées, évolutivité et popularité dans la recherche et l'industrie. De plus, le modèle ALS a déjà été implémenté et utilisé dans OLX.

Nous définissons la confiance d'une observation comme = 1 + , où est un hyperparamètre . Nous définissons également la préférence comme = (> 0). Ensuite, dans ALS, nous optimisons le expression suivante :

$$\min_{,} \sum_{,} (-)^{2} + (\sum || ||2 + \sum || ||2),$$

où est l'intégration dimensionnelle de l'utilisateur, est l'intégration dimensionnelle de l'élément, et est un paramètre de régularisation. Le nom du modèle fait référence à la méthode optimisée pour cette fonction. La procédure des moindres carrés alternés suppose que l'utilisateur ou l'élément est latent les facteurs sont fixes et déterminent analytiquement les autres. La procédure est répétée efficacement quelques fois [39,40].

Dans les approches de factorisation matricielle, l'intégration pour chaque utilisateur est apprise séparément, ce qui peut entraîner une utilisation élevée du temps et de la mémoire si le nombre d'utilisateurs est important. De plus, les recommandations peuvent manquer d'explicabilité car deux utilisateurs disposant du les mêmes interactions peuvent recevoir des recommandations différentes. Autres modèles considérés (SLIM, RP3Beta, Prod2Vec) fournissent le même ensemble de recommandations aux utilisateurs disposant du mêmes interactions.

2.3.2. Modèles basés sur le quartier

Le modèle SLIM (méthodes linéaires clairsemées pour les systèmes de recommandation Top-N [41]) est basé sur la régression des voisins les plus proches basée sur les éléments [8]. Nous avons choisi cette méthode en raison de son avantages par rapport aux modèles de factorisation matricielle et aux voisins les plus proches basés sur les éléments [41] et bonnes performances contre les approches non neuronales et neuronales [29].

Dans ce modèle, nous approchons la matrice utilisateur-élément en apprenant l'élément-élément matrice de similarité clairsemée. Explicitement, s'apprend en minimisant l'expression suivante :

$$\frac{1}{} || − 2 ||2 + \frac{}{|| 2} ||2 + || ||1,$$

Machine Translated by Google

où ≥ 0 et = 0 pour tous , , 1 ≤ , ≤ |Je|, || · || est la norme de Frobenius matricielle :

$$|| \quad || = \sum \sum_{=1}^{|Je|} \sum_{=1}^{|Je|} {}^{2},$$

|| · ||1 est la norme ℓ1 d'entrée :

$$|| \quad ||1 = \sum_{=1}^{|Je|} \sum_{=1}^{|Je|} | \quad |$$

et et sont des paramètres de régularisation.

Nous pouvons voir que chaque colonne de peut être apprise indépendamment, ce qui améliore la évolutivité de ce modèle [41].

Une limitation de cette méthode est qu'elle ne génère pas d'intégrations d'utilisateurs et d'éléments, ce qui pourrait être utile pour d'autres tâches (par exemple, regroupement d'utilisateurs ou d'éléments). Nous pouvons traiter les colonnes de la matrice comme des incorporations d'éléments, mais ce sont des vecteurs ||-dimensionnels clairsemés, ils ne peuvent donc probablement pas être directement utilisés dans d'autres tâches.

2.3.3. Approches basées sur des graphiques

RP3Beta [42] est une approche de filtrage collaboratif basée sur des graphes. De la même manière que Dacrema et al. [29], nous présentons ce modèle comme une extension du modèle P3alpha [43]. Nous considérons un graphe biparti et non orienté = (V, E), où chaque sommet V représente soit un utilisateur, soit un élément et chaque arête { , } E représente l'interaction entre un utilisateur donné et un élément donné. Soit la matrice de contiguïté et la matrice de degrés du graphi Ensuite, les scores de P3alpha sont stockés dans la matrice

$$((\quad {}^{-1} \quad)^{\circ} \quad)^{3},$$

où ◦ désigne la puissance élément par élément d'une matrice (puissance de Hadamard). Plus précisément, le score ˆ est stocké à l'intersection de la ligne représentant l'utilisateur et de la colonne représentant l'item . On peut voir que ce score est une somme des scores attribués aux chemins de longueur 3 reliant l'utilisateur et l'élément dans le graphique.

Dans RP3Beta, le score est calculé avec P3alpha et divisé par la popularité des éléments élevés au pouvoir pour atténuer le biais de popularité.

Nous avons choisi ce modèle en raison de sa simplicité, de son évolutivité et de ses performances éprouvées [29,30], en particulier compte tenu de la grande parcimonie de notre ensemble de données, ce qui réduit considérablement l'utilisation de la mémoire lors de la formation du modèle. Cela nous permet de calculer et de stocker directement la matrice de similarité élément-élément en mémoire au lieu de l'approximation de marches aléatoires proposée dans l'article original.

RP3Beta, similaire à SLIM, ne génère pas d'intégrations d'utilisateurs et d'éléments. Une autre limitation connexe est son incapacité à recommander des éléments dont la distance sur le graphe biparti utilisateur-élément est supérieure à trois par rapport à un utilisateur donné. Plus précisément, l'élément peut être recommandé à l'utilisateur uniquement si au moins un utilisateur ′ a visité l'élément et au moins un des éléments visités par l'utilisateur . De plus, le modèle RP3Beta n'a pas de paramètres optimisés pendant la formation ; par conséquent, il pourrait être incapable d'exploiter les relations complexes dans les données.

2.3.4. Prod2Vec

Le modèle Prod2Vec [44] (ou Item2vec [45]) est basé sur le modèle Word2Vec [46], largement utilisé en traitement du langage naturel. Le modèle se concentre sur l'apprentissage des représentations vectorielles d'éléments en utilisant une séquence d'éléments comme « phrase » et les éléments de cette séquence comme « mots ». Cette méthode a été choisie car elle est évolutive et très différente des méthodes comparées. De plus, cette approche est basée sur le système de recommandation de réseau neuronal profond hybride de pointe actuel utilisé dans d'autres catégories chez OLX.

Machine Translated by Google

Prod2Vec utilise le modèle skip-gram en maximisant la fonction objectif sur l'ensemble S de séquences d'éléments, définies comme suit :

$$= \sum_{S} \sum \sum_{- \le \le \neq 0} \text{journal } P(+ |),$$

où est la longueur du contexte pour les séquences d'éléments, et les éléments de la même séquence sont commandé arbitrairement. La probabilité P(+ |) d'observer un élément voisin + étant donné le l'élément actuel est défini à l'aide de la fonction soft-max :

$$P(+ |) = \frac{\exp(\quad ' \quad)}{\sum_{=1}^{|Je|} \exp(\quad ' \quad)},$$

où et sont les représentations vectorielles d'entrée et de sortie de l'élément et ‖| est le ' , nombre d'éléments uniques dans le vocabulaire. Prod2Vec modélise le contexte d'une séquence d'éléments, où les éléments avec des contextes similaires (c'est-à-dire avec des interactions voisines similaires) ont des représentations vectorielles.

Avant de générer des recommandations, nous normalisons toutes les représentations vectorielles d'entrée, ce qui améliore l'efficacité. Pour générer des recommandations, nous représentons l'utilisateur comme un moyenne des représentations vectorielles d'entrée des éléments en interaction. Ensuite, nous recherchons des éléments dont les représentations d'entrée ont la similarité cosinusoïdale la plus élevée avec la représentation utilisateur (-voisins les plus proches dans l'espace latent).

Une limitation potentielle de cette méthode est une stricte dépendance entre l'utilisateur et l'élément. représentations. Certaines interactions devraient potentiellement avoir un impact plus important que d'autres sur les représentations des utilisateurs (ce qui est possible dans les modèles de factorisation matricielle).

2.4. Lacune en matière de recherche

Cet article vise à comparer différentes méthodes de recommandation dans le domaine des catégories d'emplois, en comblant une lacune spécifique en matière de recherche. Au meilleur de nos connaissances, le Les méthodes de recommandation abordées n'ont jamais été testées ou comparées sur une grande échelle. évoluer tout en travaillant en ligne dans le domaine de l'emploi. Dans ce travail, nous comparons ces méthodes dans un en laboratoire à l'aide de l'ensemble de données que nous avons publié et de tests A/B en ligne effectués dans un environnement de production.

3. Ensemble de données sur les interactions de travail OLX

Cette recherche fournit un ensemble de données commerciales contenant 65 502 201 événements effectués sur OLX Jobs par 3 295 942 utilisateurs qui ont interagi avec 185 395 offres d'emploi en deux semaines en 2020. Nous avons publié l'ensemble de données sur Kaggle (https://www.kaggle.com/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consulté le 26 juin 2024).

Chaque ligne de l'ensemble de données représente l'événement qu'un utilisateur donné effectue concernant un objet donné. annonce à un instant donné (tableau 1). Les événements suivants impliquant les comportements des utilisateurs ont été inclus :

- clic : l'utilisateur a visité la page de détail de l'article ;
- signet : l'utilisateur a ajouté l'élément aux favoris ;
- chat_click : l'utilisateur a ouvert le chat pour contacter le propriétaire de l'élément ;
- contact_phone_click_1 : l'utilisateur a révélé le numéro de téléphone attaché à l'article ;
- contact_phone_click_2 : l'utilisateur a cliqué pour appeler le propriétaire de l'élément ;
- contact_phone_click_3 : l'utilisateur a cliqué pour envoyer un message SMS au propriétaire de l'élément ;
- contact_partner_click : l'utilisateur a cliqué pour accéder à la page externe du propriétaire de l'élément ;
- contact_chat : l'utilisateur a envoyé un message au propriétaire de l'article.

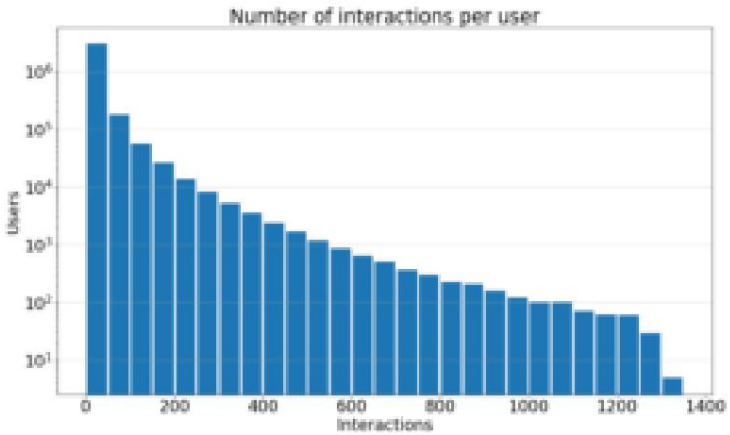
Machine Translated by Google

Tableau 1. Exemples de lignes de l'ensemble de données.

Utilisateur	Article	Événement	Horodatage
1745587	168661	cliquez	1582216025
843008	62838	cliquez	1582485868
14285	30469	sur signet	1582247367
1142944	80122	cliquez	1581805847
2835659	23728	sur chat_click	1582397836

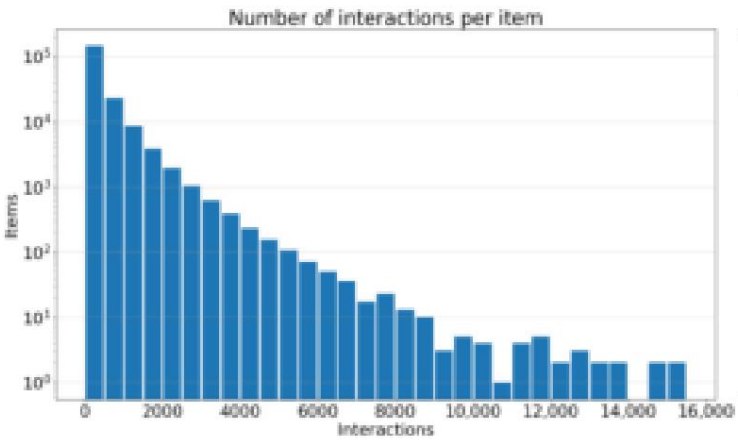
Source : propre étude.

La rareté des données (% d'entrées manquantes dans la matrice utilisateur-élément) est égale à 99,9923 %, ce qui est très faible mais typique des petites annonces (à titre de comparaison, la rareté des données sur le L'ensemble de données MovieLens 20M représente 99,47 %, ce qui le rend presque 70 fois plus dense). Distributions de les interactions par utilisateur, les interactions par élément et les événements sont fournis dans les figures 1 et 2, et tableau 2, respectivement. Nous avons utilisé une échelle logarithmique car les distributions sont fortement biaisé à droite.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	2
0.50	6
0.75	18
0.90	46
0.99	221

Figure 1. Nombre d'interactions par utilisateur. Source : propre étude.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	3
0.50	137
0.75	428
0.90	950
0.99	2944

Figure 2. Nombre d'interactions par élément. Source : propre étude.

Selon De Ruijt et Bhulai [47], les ensembles de données les plus couramment utilisés pour l'évaluation des systèmes de recommandation d'emploi sont CareerBuilder12 (https://www.kaggle.com/ concours/recommandation d'emploi, consulté le 16 juin 2024), RecSys16 [12] et Rec-Sys17 [13]. Le tableau 3 montre les statistiques des ensembles de données considérés. Le nombre de uniques les interactions sont le nombre de paires utilisateur-élément uniques avec lesquelles l'utilisateur a interagi avec le article. Même si les chercheurs utilisent les ensembles de données RecSys16 et RecSys17, ils publiés lors de concours de data science dans des conditions strictement limitées et ne sont pas est plus disponible. Par conséquent, nous n'avons pas pu calculer le nombre d'interactions uniques pour ces

Machine Translated by Google

ensembles de données. Nous avons observé que l'ensemble de données sur les interactions professionnelles OLX contient le plus grand nombre de interactions et types parmi les ensembles de données considérés.

Tableau 2. Répartition des événements.

Action	Fréquence (%)
	89.794
cliquez sur	2.628
contact_phone_click_1 signet	2.511
chat_click	2.136
contact_chat	1.448
contact_partner_click	0,701
contact_phone_click_2	0,679
contact_phone_click_3	0,103

Source : propre étude.

Tableau 3. Comparaison entre les ensembles de données de recommandations d'emploi. La lettre indique l'écart type.

	Emplois chez OLX Interactions	CareerBuilder12	RecSys16	RecSys17
Interactions	65,50 M	1,60 M	8,83 M	8,27 M
Interactions uniques	47,17 millions	1,60 M	-	-
Utilisateurs	3,30 M	0,3 2M	1,37M	1,50M
Nombre moyen de uniques interactions par utilisateur	14h31 (= 29,23)	4,99 (= 11,42)	<6,46	<5,51
Articles	0,19 M	0,37 M	1,36 M	1,31 M
Nombre moyen de uniques interactions par élément	254.42 (= 426,02)	4.38 (= 8,19)	<6,50	<6.31
Densité de la matrice d'interaction (%)	0,0077%	0,0014%	<0,0005%	<0,0004%
Types d'interactions	8	1	4	5
Horodatages				
Fonctionnalités utilisateur				
Caractéristiques de l'article				

Source : propre étude.

Il convient de noter que le maintien de la confidentialité des annonces et des utilisateurs était une priorité lors de la préparation de cet ensemble de données. Les mesures prises pour protéger la vie privée comprenaient les suivantes :

- Les identifiants d'origine des utilisateurs et des éléments ont été remplacés par des entiers aléatoires uniques ;
- Un nombre entier constant non divulgué a été ajouté à chaque horodatage ;
- Certaines fractions d'interactions ont été filtrées ;
- Certaines interactions artificielles supplémentaires ont été ajoutées.

4. Configuration expérimentale

4.1. Mise en œuvre

Nous avons mis en œuvre les méthodes mentionnées ci-dessus sur la base des développements précédents. Les détails sur la façon dont nos implémentations diffèrent des approches testées précédemment sont fournies dans le tableau 4. La mise en œuvre des méthodes de reproductibilité des résultats est disponible sur GitHub (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations, accédé le 29 mai 2024).

Machine Translated by Google

Tableau 4. Méthodes réimplémentées pour la recherche.

Méthode	Famille de méthodes	Source	Différence avec le Méthode originale
Factorisation matricielle LightFM		Implémentation basée sur : [48]. Document justificatif : [35].	Aucun
SLA	Factorisation matricielle	Implémentation basée sur : [49]. Documents justificatifs : [39,40].	Aucun
MINCE	Basé sur le quartier	Sources qui ont inspiré notre mise en œuvre : [50,51]. Document justificatif : [41].	Aucun
Basé sur un graphique RP3Beta		Source qui a inspiré notre implémentation : [52]. Documents à l'appui : [29,53].	Exécuté directement calculs sur des matrices clairsemées au lieu d'aléatoires marche à proximité.
Prod2Vec Word2Vec		Implémentation basée sur : [54]. Documents justificatifs : [44,45].	Séquences d'interactions, ordonnées par un horodatage. Représenter l'utilisateur comme une moyenne des représentations des éléments ayant interagi. Nous avons également expérimenté le CBOW (sac continu de mots).

Source : propre étude.

4.2. Objectifs de recherche en laboratoire et de tests en ligne Notre

objectif commercial ultime était d'augmenter le nombre d'utilisateurs postulant à des emplois via OLX Jobs. Pour y parvenir, nous essayons de résoudre un problème de classement ; plus précisément, nous recommandons dix éléments ayant les plus grandes chances de recevoir l'interaction d'un utilisateur donné. La question de trouver une mesure hors ligne la plus corrélée au taux de candidature dans le domaine d'emploi a été examinée par Mogenet et al. [27]. Puisque notre objectif est similaire, nous avons suivi leurs résultats en optimisant pour précision@10 (précision pour les dix premiers éléments recommandés [23]). Cependant, nous rapportons et discutons également d'autres mesures d'exactitude, de diversité et d'efficacité.

Nous nous concentrons sur les utilisateurs qui recherchent activement un emploi en interagissant avec les offres d'emploi. Par conséquent, nous ne considérons pas les utilisateurs sans interactions (utilisateurs à démarrage à froid).

4.3. Fractionnement des données

L'ensemble de données décrit dans la section 3 a été divisé en ensembles de données de formation-validation et de test, comme l'exige la méthodologie de recherche. L'ensemble de tests comprend 20 % des interactions les plus récentes. Cela signifie que sur 14 jours, environ 3 jours ont été inclus dans l'ensemble de tests (voir Figure 3). Cette façon de diviser l'ensemble de données en ensembles de formation et de test est le paramètre le plus réaliste selon Meng et al. [55], qui ont étudié plusieurs stratégies de fractionnement pour évaluer les systèmes de recommandation.

Dans les deux ensembles de données, nous avons également limité le nombre d'interactions aux interactions uniques entre un utilisateur et un élément. Si un utilisateur interagissait plus d'une fois avec un élément, seule la première interaction était comptabilisée et l'horodatage de cette interaction était associé à l'élément. Nous n'avons pas non plus fait de distinction entre les types d'interactions. De plus, deux autres modifications ont été appliquées : seuls les utilisateurs apparaissant dans l'ensemble de données de formation et de validation ont été inclus dans l'ensemble de test (car nous ne pouvions pas fournir de recommandations personnalisées à d'autres utilisateurs sans connaissances supplémentaires à leur sujet), et nous avons filtré tous les utilisateurs. paires d'éléments qui étaient présentes dans l'ensemble de formation (pour éviter de recommander des éléments déjà vus). En conséquence, nous nous sommes retrouvés avec environ 38 millions de lignes dans l' ensemble de formation et de validation et environ 6 millions de lignes dans l'ensemble de test. D'autres statistiques sur ces deux ensembles de données sont présentées dans le tableau 5.

Machine Translated by Google

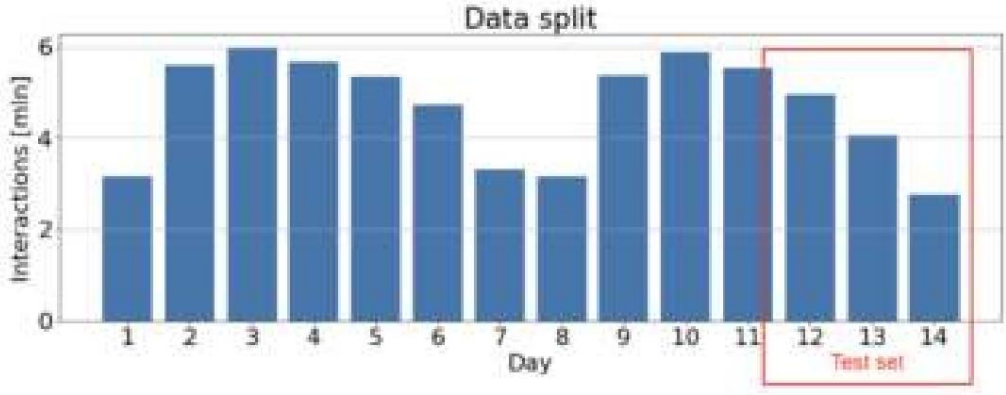


Figure 3. Préparation de l'ensemble de données (divisé en formation-validation et tests, en fonction du nombre de jours). Source : propre étude.

Tableau 5. Comparaison entre les ensembles de formation/validation et de test. La lettre désigne la norme déviation.

	Interactions de travail OLX Interactions	Ensemble de formation et de validation	Ensemble d'essai
Interactions	65,50 M	52,40 M	6,11 M
Interactions uniques	47,17 millions	38,25 M	6,11 M
Utilisateurs	3,30 M	2,83 M	0,62 M
Nombre moyen de uniques interactions par utilisateur	14h31 (= 29,23)	13h50 (= 26.11)	9,87 (= 14,38)
Articles	0,19 M	0,18 M	0,13 M
Nombre moyen de uniques interactions par élément	254.42 (= 426,02)	214.05 (= 365,93)	47.51 (= 83,84)
Densité de la matrice d'interaction (%)	0,0077%	0,0076%	0,0077%

Source : propre étude.

4.4. Réglage du modèle

Par souci de coût et de temps, lors de l'optimisation des paramètres, nous avons fait une restriction à 20% des utilisateurs et 20% des éléments de formation et de validation ensemble. Ensuite, nous divisons l'ensemble de données restreint en ensemble de données de formation-validation avec le règles décrites dans la section ci-dessus. Pour chaque modèle, 100 itérations ont été choisies par optimisation bayésienne utilisant des processus gaussiens implémentés dans scikit-learn (https://scikit-optimize.github.io/stable/modules/generated/skopt.gp_minimize.html, accédé le 29 mai 2024). Le fichier de configuration définit les espaces pour les hyperparamètres et est disponible dans notre référentiel de code (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations/blob/main/src/tuning/config.py, consulté le 29 mai 2024). Par exemple, pour RP3Beta, nous nous nous sommes limités à rechercher et dans l'intervalle [0, 2].

Des recommandations dans le processus d'optimisation ont été préparées pour 30 000 utilisateurs, et comme mentionné ci-dessus, le score d'optimisation utilisé était précision@10. La figure 4 montre le score de précision en fonction des paramètres. Il est visible que la SLA n'était pas très optimisé au sein du processus, mais pour d'autres méthodes, cette optimisation était cruciale pour améliorer la précision. Les hyperparamètres pour tous les modèles sont présentés dans le tableau 6.

Machine Translated by Google

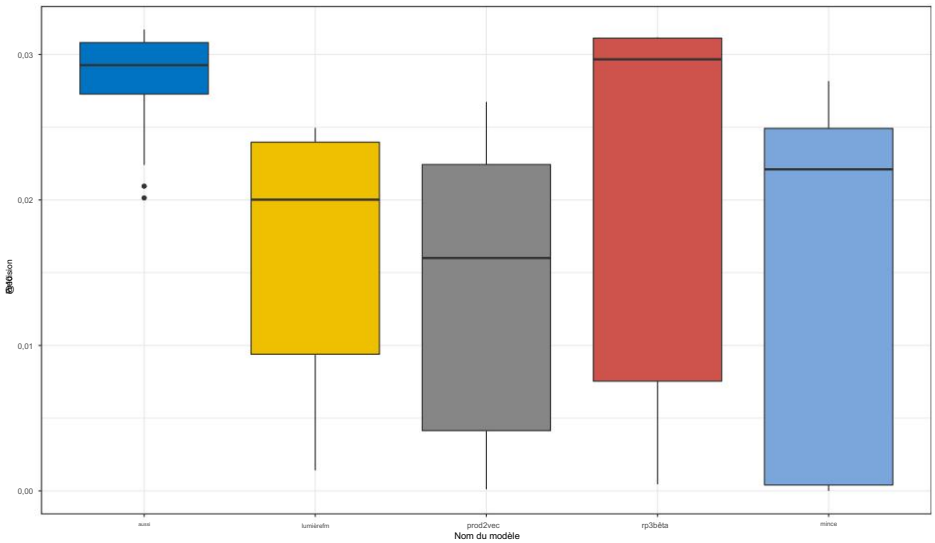


Figure 4. Précision pour chaque modèle, en fonction des paramètres. Source : propre étude.

Tableau 6. Hyperparamètres du modèle.

Modèle	Hyperparamètres du modèle
aussi	{'facteurs' : 357, 'régularisation' : 0,001, 'itérations' : 20, 'event_weights_multiplier' : 63}
lumièrefm	{'no_components' : 512, 'k' : 3, 'n' : 20, 'learning_schedule' : 'adadelta', 'loss' : 'warp', 'max_sampled' : 61, 'epochs' : 11}
prod2vec	{'vector_size' : 168, 'alpha' : 0,028728, 'window' : 20, 'min_count' : 16, 'sample' : 0,002690026, 'min_alpha' : 0,0, 'sg' : 1, 'hs' : 1, 'negative ' : 200, 'ns_exponent' : −0,16447846705441527, 'cbow_mean' : 0, 'époques': 22}
RP3Bêta	{'alpha' : 0,61447198, 'bêta' : 0,1443548}
mince	{'alpha' : 0,00181289, 'l1_ratio' : 0,0, 'itérations' : 3}

Source : propre étude.

4.5. Évaluation du modèle

Nous évaluons nos modèles en termes de précision, de diversité et d'efficacité.

La précision de la méthode de recommandation sur les ensembles de données de rétroaction implicite est généralement évalué en examinant quels éléments de la liste des principales recommandations l'utilisateur interagi avec dans l'ensemble de test [8]. De nombreuses mesures d'évaluation déterminent les mesures de chaque utilisateur séparément et présenter la moyenne comme score d'évaluation final de la méthode [23]. Le Le système de recommandation peut être considéré comme un classificateur, où les interactions de l'utilisateur dans l'ensemble de tests sont des exemples positifs et les principales recommandations sont des éléments classés comme positif par le modèle. Par conséquent, les méthodes utilisées pour évaluer les classificateurs peuvent être directement appliqué aux systèmes de recommandation. Par exemple, la valeur de précision@ pour un utilisateur donné est le nombre d'éléments recommandés avec lesquels l'utilisateur a interagi dans l'ensemble de test divisé par le nombre d'articles recommandés à cet utilisateur. D'autres mesures discutées dans ce travail étaient décrit par Tamm et al. [23].

Dans le domaine des petites annonces, principalement celui des emplois, un seul utilisateur est généralement nécessaire pour effectuer une transaction concernant une annonce donnée. Dans ce cas, la diversité des recommandations est encore plus critique que dans d'autres domaines (comme la musique, les films ou tout autre commerce électronique, hors petites annonces). Pour évaluer cet aspect, nous utilisons trois mesures : couverture des tests, Shannon l'entropie [56] et l'indice de Gini [56]. La couverture des tests fait référence à la fraction des éléments de test recommandé à au moins un utilisateur. Avec l'entropie de Shannon et l'indice de Gini, on ignore éléments en dehors de l'ensemble de test. Une plus grande couverture de test et les valeurs d'entropie de Shannon indiquent une valeur plus élevée diversité, alors que des valeurs plus élevées de l'indice de Gini indiquent une diversité plus faible.

Machine Translated by Google

La dernière étape d'évaluation en laboratoire se concentre sur l'efficacité. A cet effet, nous avons utilisé une instance AWS SageMaker ml.m5.4xlarge équipée de 64 Go de RAM et de 16 vCPU, doté d'un processeur Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL à 2,50 GHz, fonctionnant sur Amazon Linux AMI2018.03. Toutes les méthodes ont été évaluées concernant trois fonctions : le prétraitement des données, Ajustement du modèle et recommandation d'articles. Le temps d'exécution a été calculé pour le temps total nécessaire pour calculer le modèle (en heures). Le pic de mémoire a été calculé en Go, et l'utilisation maximale de la mémoire a été prise en compte lors de l'exécution d'une fonction donnée. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de la bibliothèque tracemalloc (https://docs.python.org/3/bibliothèque/tracemalloc.html, consulté le 29 mai 2024).

5. Évaluation en laboratoire

Cette section décrit l'évaluation en laboratoire des méthodes discutées dans l' ensemble de données développé. Nous avons utilisé les hyperparamètres les plus performants trouvés dans la section précédente. Chaque modèle a été formé sur l'ensemble des données de formation et de validation, et des recommandations ont été produites pour les 619 389 utilisateurs de l'ensemble de tests. Pour mieux présenter les valeurs de Pour chaque métrique hors ligne, nous avons comparé les méthodes décrites avec des méthodes simples et non personnalisées. lignes de base : l'approche produit la plus populaire et les recommandations aléatoires.

5.1. Précision

Tous les indicateurs de cette section prennent en compte les dix premières recommandations, par exemple précision@10, rappel@10. Des valeurs de mesure plus élevées indiquent une meilleure qualité des recommandations. Les valeurs ne doit pas être directement comparé aux résultats obtenus sur d'autres ensembles de données car les métriques dépendent fortement de la distribution de l'ensemble de données (par exemple, une parcimonie élevée) et la stratégie de répartition train/test [55].

5.1.1. Évaluation de la précision

Le tableau 7 présente les résultats de l'évaluation. La plupart des différences observées sont statistiquement significatif en raison du grand nombre d'utilisateurs évalués. Nous développons davantage la signification statistique des résultats de la section 5.1.2.

Tableau 7. Précision : résultats de l'évaluation. Toutes les mesures présentées ont été décrites par Tamm et al. [23]. Pour la métrique mAP, nous avons utilisé la variante avec = min(,).

Métrique RP3Beta SLIM ALS Prod2Vec LightFM Le plus populaire Aléatoire					
précision 0,0484 rappel	0,0472 0,0434 0,0368	0,0359	0,0012	0,00006	
0,0783 ndcg 0,0759	0,0736 0,0657 0,0580	0,0564	0,0012	0,00005	
mAP 0,0393 MRR	0,0721 0,0657 0,0567	0,0545	0,0016	0,00007	
0,1365 LAUC 0,5391	0,0365 0,0329 0,0282	0,0264	0,0006	0,00002	
HR 0,3131	0,1314 0,1230 0,1065	0,1034	0,0038	0,00019	
	0,5368 0,5328 289 0,3066	0,5281	0,5006	0,49999	
	0,2878 0,2537	0,2547	0,0112	0,00059	

Source : propre étude.

Nos approches surpassent largement les recommandations d'articles aléatoires et les plus populaires . La faible performance de l'approche la plus populaire résulte de la nature de petites annonces, principalement le domaine de l'emploi, où les utilisateurs sont principalement intéressés par un spécifique emplacement et catégorie. Construire des systèmes de recommandation plus sophistiqués et personnalisés est raisonnable dans un tel scénario.

Il est démontré que RP3Beta surpasse les autres approches en termes de précision métrique. Nous pensons que cela est lié à la grande rareté de notre ensemble de données. RP3Beta calcule les recommandations de manière déterministe (en exploitant des chemins de longueur trois sur un élément utilisateur graphe biparti). Toutes les autres approches utilisent des techniques d'apprentissage automatique pour trouver les utilisateurs. représentations (ALS, LightFM), représentations d'éléments (ALS, LightFM, Prod2Vec) ou direct similarités élément-élément (SLIM), qui peuvent survenir dans les cas où les utilisateurs ou les éléments ont un faible nombre d'interactions.

Machine Translated by Google

5.1.2. Comparaison statistique pour Precision@10

Nous présentons une comparaison statistique détaillée pour notre principale métrique, précision@10, afin d'identifier les différences entre les méthodes. Pour commencer, nous testons l'hypothèse nulle selon laquelle toutes les méthodes fonctionnent de la même manière et que les différences observées sont simplement aléatoires (test omnibus). Le test de Friedman [57,58] avec l' extension d'Iman et Davenport [59] est probablement le test omnibus le plus populaire, et c'est généralement un bon choix pour comparer plus de cinq algorithmes différents [60,61]. Soit le rang de la ième des méthodes sur la ième des échantillons et

$$= \frac{1}{} \sum_{=1} .$$

Dans notre cas, le nombre d'échantillons, , est le nombre d'utilisateurs dans l'ensemble de test, = 619 389. Le test compare les classements moyens des méthodes et se base sur les statistiques suivantes :

$$= \frac{(- 1)^{2}}{(- 1) - ^{2}},$$

où

$$^{2} = \frac{12}{(+ 1)} \sum_{=1} ^{2} - 3 (+ 1)$$

est la statistique de Friedman, qui a la distribution avec − 1 et (− 1) (− 1) degrés de liberté. La valeur de ce test est égale à 0. La valeur obtenue indique que nous pouvons rejeter en toute sécurité l'hypothèse nulle selon laquelle tous les algorithmes fonctionnent de la même manière. Par conséquent, nous pouvons procéder aux tests post hoc pour détecter des différences significatives par paire entre toutes les méthodes. Demšar [62] propose l'utilisation du test de Nemenyi [63], qui compare tous les algorithmes par paires. Pour un niveau de signification, le test détermine la différence critique (CD). Si la différence entre les classements moyens de deux algorithmes est supérieure à

$$\mathrm{CD} = \sqrt{\quad} \quad (+ 1 6),$$

l'hypothèse nulle que les algorithmes ont les mêmes performances est rejetée (sur la est basé statistique de plage studentisée divisée par √ 2). Demšar [62] a proposé un tracé pour vérifier les différences (le tracé CD visuellement). Les algorithmes non reliés par une ligne peuvent être considérés comme différents dans le tracé.

Dans notre cas, avec une signification = 0,05, deux algorithmes quelconques ayant une différence de un rang moyen supérieur à 0,0114 sera considéré comme inégal (Figure 5).

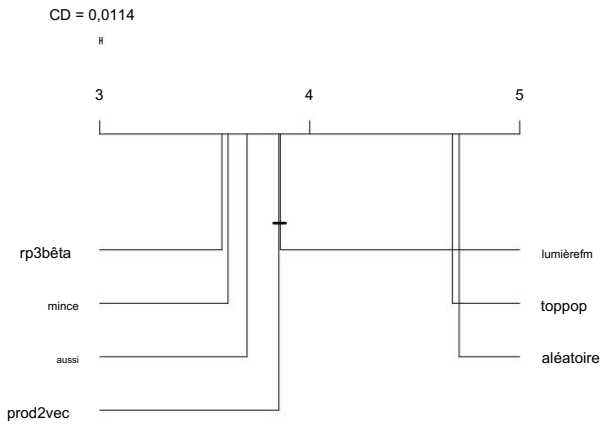


Figure 5. Diagramme de différence critique (pour plus de précision). Source : propre étude.

Machine Translated by Google

5.1.3. Précision pour les utilisateurs avec différents nombres d'interactions

Les seules informations dont nous disposons sur nos utilisateurs sont leurs interactions. Dans la figure 6, nous examinons comment le nombre d'éléments avec lesquels un utilisateur a interagi influence notre principale métrique, précision@10. Nous divisons nos utilisateurs en dix groupes de taille similaire en fonction du nombre d' interactions.

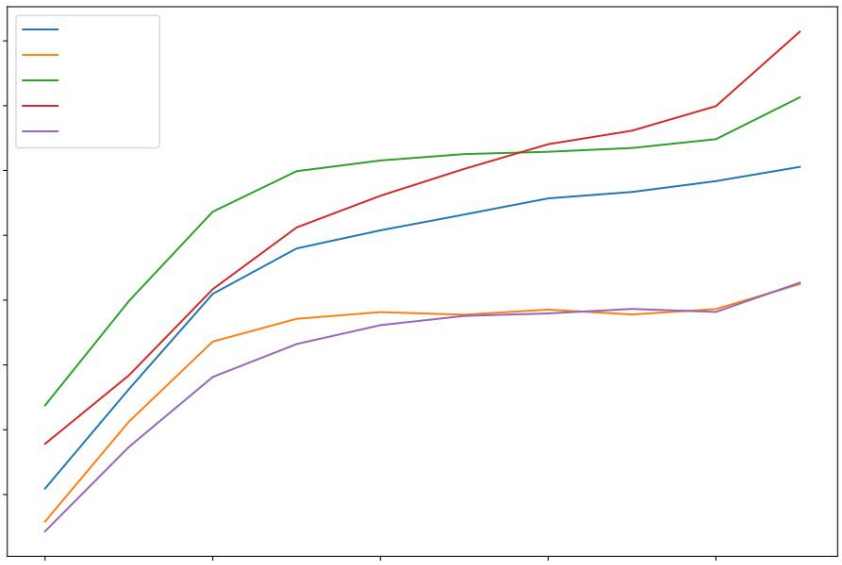


Figure 6. Precision@10 pour chaque modèle, en fonction du nombre d'éléments avec lesquels l'utilisateur a interagi. Il est préférable de le voir en couleur. Source : propre étude.

On voit que l'ordre des modèles triés par précision@10 ne dépend pas du groupe, sauf que SLIM a mieux performé que RP3Beta pour les utilisateurs ayant au moins 22 interactions. La différence est statistiquement significative pour chaque groupe d'utilisateurs (discuté à la section 5.1.4). Le modèle RP3Beta peut être considéré comme un cas particulier de l'approche de filtrage collaboratif basé sur les éléments, qui utilise une mesure de similarité déterministe entre les éléments [64]. D'autre part, SLIM utilise des méthodes d'apprentissage automatique pour découvrir les similitudes.

Nous supposons que ces scores de similarité appris sont moins biaisés mais ont une variance plus élevée, ce qui conduit à de meilleures performances pour les utilisateurs ayant de nombreuses interactions car la moyenne est effectuée sur un nombre plus important de scores.

5.1.4. Évaluation statistique de la précision pour les utilisateurs avec différents nombres d'interactions Dans cette sous-section, nous discutons de la différence entre les modèles RP3Beta et SLIM en fonction du nombre d'interactions utilisateur, comme observé dans la figure 6.

Pour comparer statistiquement deux méthodes sur plusieurs ensembles de données, Demšar [62] recommande le test de Wilcoxon signé-rank [65]. Le test de rang signé de Wilcoxon est une alternative non paramétrique au test apparié, qui classe les différences de performances de deux algorithmes pour chaque ensemble de données, en ignorant les signes. Il compare les rangs des différences positives et négatives.

Le tableau 8 montre que la différence entre les modèles RP3Beta et SLIM est statistiquement significatif pour chaque groupe d'utilisateurs.

Machine Translated by Google

Tableau 8. Résultats du test de rang signé de Wilcoxon entre les modèles RP3Beta et SLIM en fonction du nombre d'éléments avec lesquels l'utilisateur a interagi.

Poubelle	Valeur p
[1,0, 3,0)	0
[3,0, 5,0)	0
[5,0, 8,0)	0
[8,0, 11,0)	0
[11,0, 16,0)	0
[16,0, 22,0)	1,25 × 10−6
[22,0, 31,0)	9,27 × 10−7
[31,0, 45,0)	0
[45,0, 74,0)	0
[74,0, 852,0)	0

Source : propre étude.

5.2. Diversité

Dans le tableau 9, nous pouvons observer que Prod2Vec et LightFM offrent la plus grande diversité après avoir exclu les recommandations aléatoires (qui devraient avoir la plus grande diversité). Le Les diversités des modèles les plus précis, RP3Beta, SLIM et ALS, sont similaires, à l'exception du cas de la faible couverture des tests de la SLA. La relation entre la couverture des tests et la précision @ 10 est illustré à la figure 7.

Tableau 9. Diversité : résultats de l'évaluation.

Métrique	RP3Beta SLIM ALS Prod2Vec LightFM Le plus populaire Aléatoire			
couverture des tests	0,5171 0,3038 0,7400	0,7031 0,0002	0,9778	
0,5725 Shannon 9,5271	9,6728 9,6270 10,4031	10,1385 2,3296	11.7267	
Gini 0,9083	0,9029 0,9120 0,7956	0,8397 0,9999	0,1159	

Source : propre étude.

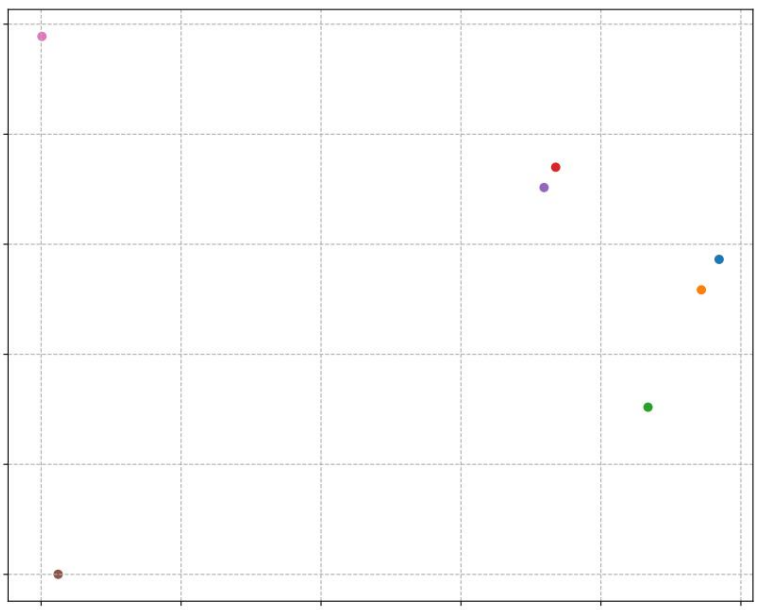


Figure 7. Couverture des tests par rapport à la précision @ 10 pour les modèles considérés. Source : propre étude.

Machine Translated by Google

5.3. Chevauchement des méthodes

Dans nos recherches, nous nous concentrons sur les méthodes qui méritent d'être testées auprès de vrais utilisateurs. Donc, nous avons étudié la superposition des recommandations proposées par les méthodes mises en œuvre concernant les couples utilisateur-élément (Overlap Coefficient [66]). Nous nous attendons à des résultats plus importants différences dans les recommandations lors de la comparaison de méthodes avec un faible chevauchement.

Les résultats de cette expérience sont rapportés dans le tableau 10. RP3Beta et SLIM proposent recommandations similaires. Bien qu'ils soient calculés différemment, ils utilisent un élément clairsemé matrice de similarité. Le groupe de comparaison atteint de SLA présente des similitudes moyennes avec les autres méthodes. Les plus différents du point de vue du chevauchement sont aussi les modèles les plus divers, à savoir Prod2Vec et LightFM. Le faible chevauchement d'ALS et de LightFM souligne le importance du choix de la fonction de perte dans les approches de factorisation matricielle.

Tableau 10. Chevauchement des modèles.

Modèle	RP3Bêta	MINCE	SLA	Prod2Vec	LumièreFM
RP3Beta	100%	73%	53%	37%	38%
SLIM	73%	100%	50%	35%	35%
ALS	53%	50%	100%	38%	37%
Prod2Vec	37%	35%	38%	100%	28%
LightFM	38%	35%	37%	28%	100%

Source : propre étude.

5.4. Évaluation de l'efficacité

Les résultats de l'évaluation de l'efficacité sont présentés à la figure 8. RP3Beta, ALS et LightFM surpasse SLIM et Prod2Vec en termes de temps d'exécution, alors que Prod2Vec nécessite le moins de mémoire. Pour recycler fréquemment le modèle, nous définissons le maximum acceptable temps d'exécution de 3 h, ce qui a été satisfait par ALS, LightFM et RP3Beta. D'un coût Dans une perspective, l'utilisation acceptable de la mémoire a été fixée à 110 Go, ce qui est le cas pour tous les modèles. accompli. Nous pouvons observer que nos modèles pourraient être formés même sur un seul ordinateur portable.

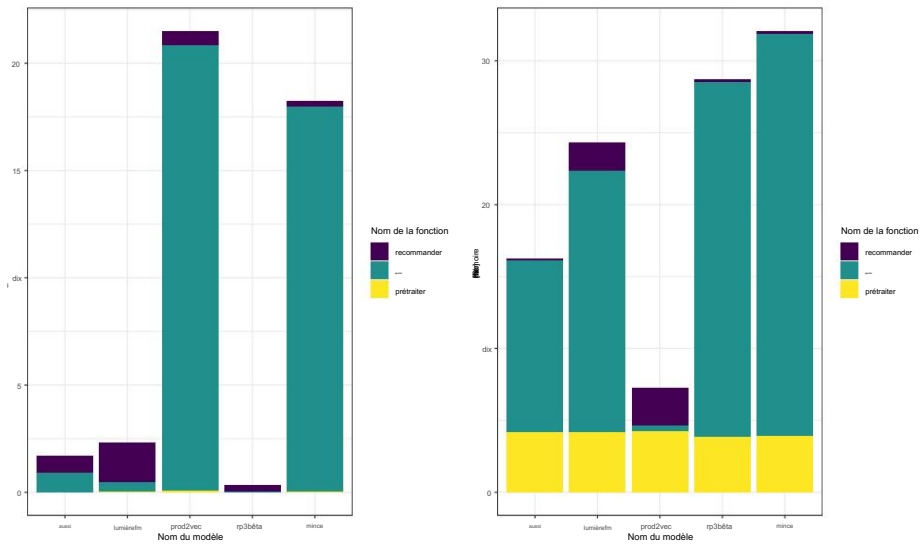


Figure 8. Temps d'exécution et utilisation de la mémoire. Il est préférable de le voir en couleur. Source : propre étude.

5.5. Résumé

Les recherches en laboratoire nous ont permis de sélectionner des modèles à tester en ligne avec OLX utilisateurs. Premièrement, nous avons choisi le modèle RP3Beta pour les tests en ligne car c'est la meilleure approche concernant l'exactitude et le temps d'exécution. La consommation de mémoire relativement élevée est toujours suffisamment bas pour que le modèle puisse être testé en production. Enquêter sur l'impact de cela la diversité relativement faible de la méthode pourrait constituer une voie de recherche future passionnante.

Machine Translated by Google

SLIM est le deuxième meilleur modèle en termes de précision@10. Néanmoins, nous n'avons pas sélectionné cette méthode pour l'évaluation en ligne en raison de sa faible efficacité et de son chevauchement élevé avec le modèle RP3Beta déjà sélectionné. L'amélioration de l'efficacité de la mise en œuvre de SLIM pourrait modifier cette décision.

Entre autres modèles, la plus haute précision@10 est obtenue par ALS. De plus, ALS était déjà implémenté et utilisé pour les recommandations d'emploi chez OLX ; nous avons donc décidé de l'inclure dans la comparaison en ligne.

Même si Prod2Vec et LightFM produisent les recommandations les plus diverses, nous avons décidé de ne pas les tester en ligne en raison de la précision@10 et de l'efficacité nettement inférieures de Prod2Vec.

6. Évaluation en ligne

Pour évaluer l'efficacité des méthodes sélectionnées, nous avons effectué deux tests A/B en ligne auprès des utilisateurs d'OLX Jobs. Nous nous sommes concentrés sur les utilisateurs qui avaient récemment consulté des offres d'emploi sur notre plateforme. Nous leur avons envoyé des e-mails contenant dix offres d'emploi recommandées, et lorsqu'un utilisateur avait installé une application OLX, une notification push avec une offre d'emploi recommandée était également envoyée. Ensuite, nous avons observé si l'utilisateur avait postulé pour un emploi dans les 48 heures suivantes (utilisateur converti).

6.1. Impact du modèle SLA

La première expérimentation visait à répondre à la question : l'introduction de la méthode de recommandation augmente-t-elle le nombre d'utilisateurs postulant à un emploi ? Dans ce test, nous avons divisé les utilisateurs en deux groupes : un groupe témoin sans recommandations et un groupe avec des recommandations générées à l'aide du modèle ALS. Seulement ≈ 10 % des utilisateurs ont été affectés au groupe témoin car le modèle ALS était déjà implémenté et utilisé pour les recommandations d'emploi chez OLX avant le test. Nous avons préféré collecter un échantillon minimal en effectuant un test plus étendu pour observer un impact à plus long terme sur nos utilisateurs. Le test a été réalisé pendant 25 jours en mars 2021. Les résultats sont présentés dans le tableau 11. La signification statistique de l'avantage de l'ALS par rapport au groupe témoin a été examinée à l'aide du test du chi carré et la valeur s'est avérée égale à 0. Cette expérience a confirmé notre hypothèse selon laquelle les recommandations affectent l'activité, puisque le pourcentage d'utilisateurs convertis après avoir reçu une communication a augmenté de manière significative de (16,83 % − 15,98 %)/15,98 % ≈ 5,3 %.

L'augmentation observée se traduit par des centaines d'utilisateurs supplémentaires postulant quotidiennement à des emplois via OLX Jobs.

Tableau 11. Comparaison des activités avec ou sans recommandations.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
contrôle	129 308	15,98%
SLA	1 170 262	16,83%

Source : propre étude.

6.2. Comparaison des modèles ALS et RP3Beta

Dans la deuxième expérience, nous avons vérifié si le meilleur modèle issu des tests en laboratoire surpassait l'ALS. Nous divisons nos utilisateurs en trois groupes, recevant des recommandations de différents systèmes de recommandation : ALS, RP3Beta et une variante mixte. Nous avons généré la moitié des recommandations avec ALS et l'autre moitié avec RP3Beta. La deuxième expérience a été menée pendant 28 jours en mars et avril 2021. Les résultats sont présentés dans le

Le pourcentage d'utilisateurs convertis est calculé ici par rapport à l'ensemble des utilisateurs ; cependant, la modification du système de recommandation n'a pas affecté les utilisateurs qui n'ont pas ouvert le message. Nous avons décidé de les filtrer, car leur comportement ajoutait du bruit inutile à nos données. Le tableau 13 présente l'impact sur les utilisateurs qui ont ouvert le message. L'avantage de RP3Beta sur la SLA est statistiquement significatif (valeur p ≈ 10−6). La différence entre les variantes RP3Beta et ALS+RP3Beta n'est pas statistiquement significative (la valeur p est de 0,19).

Machine Translated by Google

Tableau 12. Comparaison des différentes méthodes de recommandation.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
SLA	343 892	15,25%
RP3Bêta	345 273	15,40%
ALS+RP3Bêta	343 896	15,30%

Source : propre étude.

Tableau 13. Comparaison des différentes méthodes de recommandation pour les utilisateurs ayant ouvert le message.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
SLA	44 775	19,66%
RP3Bêta	46 097	20,94%
ALS+RP3Bêta	45 469	20,59%

Source : propre étude.

Parmi les utilisateurs qui ont ouvert le message, nous avons observé 1,28 pp (points de pourcentage) plus d'utilisateurs convertis de RP3Beta que d'ALS. Le taux d'ouverture des messages étant de 13,2 %, cela équivaut à une augmentation de 1,28 × 0,132 ≈ 0,17 pp de tous les utilisateurs ciblés. Basé sur Selon les résultats de la première expérience, l'ALS apporte une augmentation de 0,85 pp par rapport au groupe témoin. Cela signifie que le remplacement d'ALS par RP3Beta augmente notre impact sur tous les utilisateurs cibles d'environ 0,17/0,85 = 20 %.

6.3. Discussion

Nous avons prouvé que l'envoi de recommandations d'emploi à partir du modèle ALS augmente la nombre d'utilisateurs répondant aux offres d'emploi de plus de 5 %. De plus, RP3Beta est considérablement surpasse la SLA.

De plus, nous avons effectué un autre test A/B en ligne comparant le modèle RP3Beta avec une variante où nous avons remplacé la moitié des recommandations RP3Beta par des recommandations généré à partir du système de recommandation hybride d'apprentissage profond utilisé chez OLX (https://tech.olx.com/item2vec-neural-item-embeddings-to-enhance-recommendations-1fd948a6f293, consulté le 29 mai 2024). Nous avons décidé de ne pas décrire ce test dans cet article, car ce travail se concentre sur les approches de filtrage collaboratif. Nous souhaitions également que nos résultats restent reproductibles sur l'ensemble de données publié. Malheureusement, nous n'avons pas pu publier toutes les fonctionnalités utilisé par notre modèle interne. Nous n'avons observé aucune amélioration par rapport à RP3Beta, même si le deuxième modèle utilise des connaissances supplémentaires sur les offres d'emploi. Par conséquent, nous a confirmé qu'un modèle simple correctement déterminé et réglé pourrait surperformer davantage solutions profondes avancées. Ceci est cohérent avec les résultats de Dacrema et al. [64] et Anelli et coll. [30], qui ont comparé plusieurs approches non neuronales, dont RP3Beta, avec modèles neuronaux plus avancés.

L'efficacité du modèle RP3Beta permet à OLX Jobs de le former à partir de zéro fois par jour avec des coûts très faibles (sur un CPU). Le filtrage collaboratif de pointe Le modèle des emplois OLX est actuellement utilisé pour générer des e-mails et pousser des recommandations pour nos utilisateurs. Nous avons récemment adapté ce modèle pour fournir des recommandations sur site en temps réel, en tenant compte des interactions récentes des utilisateurs avec les éléments [67]. Nous avons également proposé l'apprentissage P3 pour Rank (P3LTR) [68], une généralisation du RP3Beta, où l'on apprend l'importance des relations utilisateur-élément en fonction des types d'interactions passées utilisateur-élément et des horodatages.

Dans ce travail, nous avons comblé les lacunes de la recherche liées au manque de comparaisons entre approches classiques de filtrage collaboratif dans le domaine professionnel en fournissant des recherche en laboratoire sur un ensemble de données du monde réel et évaluation en ligne auprès de millions d'utilisateurs. De plus, nous avons rendu public le code source pour l'évaluation hors ligne et l'ensemble de données. disponible. Nous encourageons d'autres chercheurs à développer de nouvelles méthodes de recommandation pour aider les utilisateurs à trouver plus rapidement leur emploi idéal.

Les méthodes considérées dans ce travail ne nécessitent que des triplets (utilisateur, élément et horodatage) comme données d'entrée pour la formation et l'évaluation ; par conséquent, ils peuvent être appliqués dans plusieurs domaines,

Machine Translated by Google

même pour des ensembles de données constitués de dizaines de millions d'interactions. Nous nous attendons à de bons résultats dans le domaine des petites annonces sur la base de nos premiers résultats obtenus dans d'autres catégories d'OLX.

7. Résumé

Cet article a abordé le sujet des recommandations d'emploi dans les petites annonces en ligne, en utilisant l'exemple d'OLX Jobs. Nous avons effectué une évaluation approfondie d'approches représentant différentes familles de méthodes de recommandation.

Au cours des recherches en laboratoire, nous avons démontré que RP3Beta, SLIM et ALS fonctionnent nettement mieux que LightFM et Prod2Vec. Nous avons également constaté que Prod2Vec offre la diversité la plus extraordinaire, ce qui peut s'avérer nécessaire lorsqu'on travaille sur la nouveauté des recommandations. De plus, nous avons examiné à quel point les recommandations générées par différents modèles sont similaires.

Nous avons également procédé à une évaluation en envoyant des millions de messages aux utilisateurs en ligne. Des tests A/B ont été réalisés avec ALS et RP3Beta. Les résultats de ces tests ont démontré que l'envoi de recommandations d'emploi générées par ces modèles augmente le nombre d'utilisateurs contactant les annonceurs depuis OLX Jobs. Avec RP3Beta disponible dans l' environnement de production, nous avons amélioré notre efficacité de 20 % (en tenant compte des réactions des utilisateurs).

Lors de l'évaluation des méthodes du point de vue des petites annonces, un modèle recommandant les éléments les plus populaires (encore inédits) n'était pas adapté aux recommandations d'emploi. Un modèle de recommandation basé sur des recommandations aléatoires a également été ajouté à des fins de comparaison afin de démontrer l'avantage des méthodes étudiées.

Un autre résultat important de cette recherche est l'ensemble de données, qui permettra d'approfondir les recherches sur les recommandations pour les besoins classifiés.

L'une des faiblesses de nos travaux est le manque de comparaison avec les réseaux de neurones profonds (DNN) ou les réseaux de neurones graphiques (GNN). Pour de telles méthodes, satisfaire nos contraintes de temps sans infrastructure plus coûteuse (par exemple avec GPU) est un défi. Assouplir nos contraintes ou comparer les DNN ou GNN les plus efficaces serait intéressant pour des travaux futurs. Une autre faiblesse est que la comparaison ne porte que sur un seul ensemble de données. La taille de l'ensemble de données a un impact significatif sur la sélection de la méthode. Il serait intéressant de comparer les mêmes méthodes sur des ensembles de données de différentes tailles, soit des sous-ensembles de l' ensemble de données d'origine, soit d'autres ensembles de données du domaine professionnel (par exemple, provenant de différents marchés sur lesquels OLX opère). De plus, il serait intéressant d'explorer la corrélation entre la diversité et les résultats en ligne, dans le but de développer une mesure hors ligne qui s'aligne mieux sur les objectifs commerciaux.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, RK ; méthodologie, RK et TG ; logiciels, RK et VD ; validation, RK, VD, TG et AF ; analyse formelle, RK et TG ; enquête, RK et TG ; ressources, RK; conservation des données, RK et VD ; rédaction – préparation du projet original, RK, AF et TG ; rédaction – révision et édition, RK, AF et TG ; visualisation, RK et TG ; supervision, TG et AF ; administration du projet, RK Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : ensemble de données : https://www.kaggle.com/datasets/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consulté le 29 mai 2024 ; code source : https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommandations , consulté le 29 mai 2024

Conflits d'intérêts : les auteurs Robert Kwieci 'nski, Agata Filipowska et Viacheslav Dubrov étaient employés par la société OLX Group. L'autre auteur déclare que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Les références

1. Davis, M. Que sont les petites annonces en ligne ? Big Easy Magazine, 4 janvier 2021. 2.
Jones, S. Petites annonces en ligne ; Projet Pew Internet & American Life : Washington, DC, États-Unis, 2009.
3. Gourville, J. ; Soman, D. Surchoix et type d'assortiment : quand et pourquoi la variété se retourne contre lui. Marque. Sci. 2005, 24, 382-395.
[Référence croisée]

Machine Translated by Google

4. Chernev, A. Quand plus c'est moins et moins c'est plus : le rôle de la disponibilité et de l'assortiment de points idéaux dans le choix du consommateur. J. Consommer. Rés. 2003, 30, 170-183. [Référence croisée]

5. Constructeur de bateaux, P. ; Nunes, J. Réduire l'assortiment : une approche basée sur les attributs. J.Marc. 2001, 65, 50-63. [Référence croisée]

6. Gómez-Uribe, C. ; Hunt, N. Le système de recommandation Netflix. ACM Trans. Gérer. Inf. Système. 2015, 6, 1-19. [Référence croisée]

7. Smith, B. ; Linden, G. Deux décennies de systèmes de recommandation sur Amazon.com. Informatique Internet IEEE. 2017, 21, 12-18. [Référence croisée]

8. Aggarwal, CC Recommender Systems : Le manuel, 1ère éd. ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016. 9.

Li, S. ; Karahanna, E. Systèmes de recommandation en ligne dans un contexte de commerce électronique B2C : examen et orientations futures. J. Assoc. Inf. Système. 2015, 16, 72-107. [Référence croisée]

10. Twardowski, B. Modélisation d'informations contextuelles dans des systèmes de recommandation sensibles aux sessions avec des réseaux de neurones. Dans Actes de la 10e conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Boston, MA, États-Unis, 15-19 septembre 2016 ; pp. 273-276. [Référence croisée]

11. Alotaibi, S. Une enquête sur les systèmes de recommandation d'emploi. Int. J. Phys. Sci. 2012, 7, 5127-5142. [Référence croisée]

12. Abel, F. ; Benczur, A. ; Kohlsdorf, D. ; Larson, M. ; Pálovics, R. RecSys Challenge'16 : Actes du Recommender Systems Challenge ; Association pour les machines informatiques : New York, NY, États-Unis, 2016.

13. Abel, F. ; Deldjoo, Y. ; Elahi, M. ; Kohlsdorf, D. RecSys Challenge'17 : Actes du Recommender Systems Challenge 2017 ; Association pour les machines informatiques : New York, NY, États-Unis, 2017.

14. Li, S. ; Shi, B. ; Yang, J. ; Yan, J. ; Wang, S. ; Chen, F. ; Lui, Q. Deep Job Understanding chez LinkedIn. Dans Actes de la 43e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en matière de recherche d'informations, virtuelle, 25-30 juillet 2020 ; pp. 2145-2148. [Référence croisée]

15. Zhu, G. ; Chen, Y. ; Wang, S. Recommandations personnalisées de cours et d'emplois basées sur la communauté graphique avec des données inter-domaines L'intégration. Durabilité 2022, 14, 7439. [CrossRef]

16. Lacic, E. ; Reiter-Haas, M. ; Kowald, D. ; Reddy Dareddy, M. ; Cho, J. ; Lex, E. Utilisation d'encodeurs automatiques pour les recommandations de tâches basées sur les sessions. rendez-vous. Modèle utilisateur. Adaptation utilisateur. Interagir. 2020, 30, 617-658. [Référence croisée]

17. Pazzani, MJ; Billsus, D. Systèmes de recommandation basés sur le contenu. Dans Le Web adaptatif : méthodes et stratégies du Web Personnalisation; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2007 ; pp. 325-341. [Référence croisée]

18. Chen, R. ; Hua, Q. ; Chang, YS; Wang, B. ; Zhang, L. ; Kong, X. Une enquête sur les systèmes de recommandation basés sur le filtrage collaboratif : des méthodes traditionnelles aux méthodes hybrides basées sur les réseaux sociaux. Accès IEEE 2018, 6, 64301-64320. [Référence croisée]

19. Wang, X. ; Lui, X. ; Wang, M. ; Feng, F. ; Chua, Filtrage collaboratif TS Neural Graph. Dans Actes de la 42e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en recherche d'information, Paris, France, 21-25 juillet 2019 ; pp. 165-174. [Référence croisée]

20. Schäfer, JB ; Frankowski, D. ; Herlocker, J. ; Sen, S. Systèmes de recommandation de filtrage collaboratif. Dans Le Web adaptatif ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2007 ; pp. 291-324. [Référence croisée]

21. Takacs, G. ; Pilaszy, I. ; Németh, B. ; Tikk, D. Approches de filtrage collaboratif évolutives pour les grands systèmes de recommandation. J. Mach. Apprendre. Rés. 2009, 10, 623-656. [Référence croisée]

22. Jawaheer, G. ; Szomszor, M. ; Kostkova, P. Comparaison des commentaires implicites et explicites d'un service de recommandation musicale en ligne. Dans Actes du 1er atelier international sur l'hétérogénéité et la fusion de l'information dans les systèmes de recommandation, Barcelone, Espagne, 26 septembre 2010 ; p. 47-51. [Référence croisée]

23. Tamm, YM; Damdinov, R. ; Vasilev, A. Mesures de qualité dans les systèmes de recommandation : calculons-nous les mesures de manière cohérente ? Dans Actes de la quinzième conférence de l'ACM sur les systèmes de recommandation, Amsterdam, Pays-Bas, 27 septembre-1er octobre 2021 ; pp. 708-713. [Référence croisée]

24. Kaminskas, M. ; Bridge, D. Diversité, hasard, nouveauté et couverture : une enquête et une analyse empirique des objectifs au-delà de la précision dans les systèmes de recommandation. ACM Trans. Interagir. Intell. Système. 2016, 7, 1-42. [Référence croisée]

25. Kunaver, M. ; Pozrl, T. Diversité dans les systèmes de recommandation, une enquête. Système basé sur les connaissances. 2017, 123, 154-162. [Référence croisée]

26. Ge, M. ; Delgado-Battenfeld, C. ; Jannach, D. Au-delà de la précision : évaluation des systèmes de recommandation par couverture et par hasard. Dans Actes de la quatrième conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Barcelone, Espagne, 26-30 septembre 2010 ; pp. 257-260. [Référence croisée]

27. Mogenet, A. ; Pham, TAN; Kazama, M. ; Kong, J. Prédire les performances en ligne des systèmes de recommandation d'emploi avec évaluation hors ligne. Dans Actes de la 13e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Copenhague, Danemark, 16-20 septembre 2019 ; pp. 477-480. [Référence croisée]

28. Anelli, VW ; Bellogín, A. ; Di Noia, T. ; Jannach, D. ; Pomo, C. Algorithmes de recommandation Top-N : une quête de l'état de l'art. Dans Actes de la 30e conférence ACM sur la modélisation, l'adaptation et la personnalisation des utilisateurs, Barcelone, Espagne, 4-7 juillet 2022 ; 121-131. [Référence croisée]

29. Dacrema, MF; Boglio, S. ; Crémonesi, P. ; Jannach, D. Une analyse troublante de la reproductibilité et des progrès du système de recommandation Recherche sur les systèmes. ACM Trans. Inf. Système. 2021, 39, 1–49. [Référence croisée]

30. Anelli, VW ; Bellogín, A. ; Di Noia, T. ; Pomo, C. Repenser la comparaison entre le filtrage collaboratif neuronal et la factorisation matricielle. Dans Actes de la quinzième conférence de l'ACM sur les systèmes de recommandation, Amsterdam, Pays-Bas, 27 septembre-1er octobre 2021 ; pp. 521-529. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

31. Zhu, J. ; Dai, Q. ; Su, L. ; Mar.; Liu, J. ; Cai, G. ; Xiao, X. ; Zhang, R. BARS : Vers une analyse comparative ouverte pour les systèmes de recommandation. Dans Actes de la 45e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en recherche d'informations, Madrid, Espagne, 11-15 juillet 2022 ; pp. 2912-2923. [Référence croisée]
32. Dong, Y. ; Li, J. ; Schnabel, T. Quand plus récent n'est pas meilleur : l'apprentissage profond profite-t-il vraiment aux recommandations issues des commentaires implicites ? Dans les actes de la 46e conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en matière de recherche d'informations, Taipei, Taiwan, 23-27 juillet 2023 ; pp. 942-952. [Référence croisée]
33. Anelli, VW ; Malitesta, D. ; Pomo, C. ; Bellogin, A. ; Di Sciascio, E. ; Di Noia, T. Remettre en question le mythe du filtrage collaboratif de graphes : une analyse raisonnée et axée sur la reproductibilité. Dans Actes de la 17e conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Singapour, 18-22 septembre 2023 ; pp. 350-361. [Référence croisée]

34. Koren, Y. ; Cloche, R. ; Volinsky, C. Techniques de factorisation matricielle pour les systèmes de recommandation. Ordinateur 2009, 42, 30-37. [Référence croisée]
35. Kula, M. Intégrations de métadonnées pour les recommandations de démarrage à froid des utilisateurs et des éléments. arXiv 2015, arXiv : 1507.08439.
36. Rendle, S. ; Freudenthaler, C. ; Gantner, Z. ; Schmidt-Thieme, L. BPR : Classement personnalisé bayésien à partir de commentaires implicites. arXiv 2012, arXiv:1205.2618 37. Weston, J. ; Bengio, S. ; Usunier, N.
Wsabie : Passage à l'annotation d'images de grand vocabulaire. Dans Actes de la vingt-deuxième Conférence internationale conjointe sur l'intelligence artificielle, Barcelone, Espagne, 16-22 juillet 2011 ; pages 2764 à 2770.
38. Weston, J. ; Oui, H. ; Weiss, RJ Apprendre à classer les recommandations avec la perte statistique d'ordre K. Dans Actes de la 7e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Hong Kong, Chine, 12-16 octobre 2013 ; pp. 245-248. [Référence croisée]
39. Hu, Y. ; Koren, Y. ; Volinsky, C. Filtrage collaboratif pour les ensembles de données de rétroaction implicite. Dans les actes du huitième IEEE 2008 Conférence internationale sur l'exploration de données, Pise, Italie, 15-19 décembre 2008 ; pp. 263-272. [Référence croisée]
40. Takacs, G. ; Pilaszy, I. ; Tikk, D. Applications de la méthode du gradient conjugué pour le filtrage collaboratif à rétroaction implicite. Dans Actes de la cinquième conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Chicago, Illinois, États-Unis, 23-27 octobre 2011 ; pp. 297-300. [Référence croisée]
41. Ning, X. ; Karypis, G. SLIM : Méthodes linéaires clairsemées pour les systèmes de recommandation Top-N. Dans les actes de la 11e conférence internationale de l'IEEE 2011 sur l'exploration de données, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 11-14 décembre 2011 ; pp. 497-506. [Référence croisée]
42. Christoffel, F. ; Paudel, B. ; Newell, C. ; Bernstein, A. Blockbusters et Wallflowers : recommandations précises, diverses et évolutives avec des marches aléatoires. Dans Actes de la 9e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Vienne, Autriche, 16-20 septembre 2015 ; pp. 163-170. [Référence croisée]

43. Cooper, C. ; Lee, SH; Radzik, T. ; Siantos, Y. Promenades aléatoires dans les systèmes de recommandation : calcul exact et simulations. Dans Actes de la 23e Conférence internationale sur le World Wide Web, New York, NY, États-Unis, 7-11 avril 2014 ; pp. 811-816. [Référence croisée]
44. Grbovic, M. ; Radosavljevic, V. ; Djuric, N. ; Bhamidipati, N. ; Savla, J. ; Bhagwan, V. ; Sharp, D. Le commerce électronique dans votre boîte de réception : recommandations de produits à grande échelle. Dans Actes de la 21e Conférence internationale ACM SIGKDD sur la découverte des connaissances et l'exploration de données, Sydney, NSW, Australie, 10-13 août 2015 ; pages 1809-1818. [Référence croisée]
45. Barkan, O. ; Koenigstein, N. ITEM2VEC : intégration d'éléments neuronaux pour le filtrage collaboratif. Dans les actes du 26e atelier international de l'IEEE 2016 sur l'apprentissage automatique pour le traitement du signal (MLSP), Vietri sul Mare, Italie, 13-16 septembre 2016 ; p. 1 à 6. [Référence croisée]
46. Mikolov, T. ; Sutskever, I. ; Chen, K. ; Corrado, G. ; Dean, J. Représentations distribuées de mots et d'expressions et leur compositionnalité. Dans Actes de la 26e Conférence internationale sur les systèmes de traitement de l'information neuronale — Volume 2, Red Hook, NY, États-Unis, 5-10 décembre 2013 ; pages 3111 à 3119.

47. De Ruijt, C. ; Bhulai, S. Systèmes de recommandation d'emploi : une revue. arXiv 2021, arXiv :2111.13576.
48. Kula, M. LightFM — Référentiel Github. 2023. Disponible en ligne : https://github.com/lyst/lightfm (consulté le 29 mai 2024).
49. Frederickson, B. ALS — Référentiel Github. 2022. Disponible en ligne : https://github.com/benfred/implicit/blob/main/implicit/als.py (consulté le 29 mai 2024).
50. Lévy, M. ; Grisel, O. SLIM — Référentiel Github. 2014. Disponible en ligne : https://github.com/Mendeley/mrec/blob/master/ mrec/item_similarity/slim.py (consulté le 29 mai 2024).

51. Quadrana, M. SLIM — Référentiel Github. 2021. Disponible en ligne : https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Évaluation/blob/master/SLIM_ElasticNet/SLIMElasticNetRecommender.py (consulté le 29 mai 2024).
52. Bernardis, C. RP3Beta — Référentiel Github. 2021. Disponible en ligne : https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Évaluation/blob/master/GraphBased/RP3betaRecommender.py (consulté le 29 mai 2024).
53. Paudel, B. ; Christoffel, F. ; Newell, C. ; Bernstein, A. Recommandations actualisables, précises, diverses et évolutives pour les applications interactives Applications. ACM Trans. Interagir. Intell. Système. 2016, 7, 1–34. [Référence croisée]
54. Reh ˚u ˇrek, R. ; Sojka, P. Cadre logiciel pour la modélisation de sujets avec de grands corpus. Dans Actes de l'atelier LREC 2010 sur les nouveaux défis pour les cadres de PNL, La Valette, Malte, 22 mai 2010 ; pp. 45-50, ISBN 2-9517408-6-7. Disponible en ligne : http://is.muni.cz/publication/884893/en (consulté le 29 mai 2012).

55. Meng, Z. ; McCreadie, R. ; Macdonald, C. ; Ounis, I. Explorer les stratégies de fractionnement des données pour l'évaluation des modèles de recommandation. Dans Actes de la 14e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, virtuelle, 22-26 septembre 2020 ; pp. 681-686. [Référence croisée]
56. Shani, G. ; Gunawardana, A., Évaluation des systèmes de recommandation. Dans le manuel des systèmes de recommandation ; Springer : Boston, MA, États-Unis, 2011 ; pp. 257-297. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

57. Friedman, M. L'utilisation des rangs pour éviter l'hypothèse de normalité implicite dans l'analyse de la variance. Confiture. Stat. Assoc. 1937, 32, 675-701. [Référence croisée]
58. Friedman, M. Une comparaison de tests alternatifs de signification pour le problème des classements. Anne. Mathématiques. Stat. 1940, 11, 86-92. [Référence croisée]
59. Iman, RL; Davenport, JM Approximations de la région critique de la statistique de Friedman. Commun. Méthodes de théorie statistique 1980, 9, 571-595. [Référence croisée]
60. García, S. ; Herrera, F. Une extension sur les « Comparaisons statistiques de classificateurs sur plusieurs ensembles de données » pour toutes les comparaisons par paires. J. Mach. Apprendre. Rés. 2008, 9, 2677-2694.
61. García, S. ; Fernández, A. ; Luengo, J. ; Herrera, F. Tests non paramétriques avancés pour des comparaisons multiples dans la conception d'expériences en intelligence informatique et en exploration de données : analyse expérimentale de la puissance. Inf. Sci. 2010, 180, 2044-2064. [Référence croisée]
62. Demšar, J. Comparaisons statistiques de classificateurs sur plusieurs ensembles de données. J. Mach. Apprendre. Rés. 2006, 7, 1–30.
63. Nemenyi, P. Comparaisons multiples sans distribution. doctorat Thèse, Université de Princeton, Princeton, NJ, États-Unis, 1963.
64. Dacrema, MF; Crémonesi, P. ; Jannach, D. Faisons-nous vraiment beaucoup de progrès ? Une analyse inquiétante des récentes approches de recommandation neuronale. Dans Actes de la 13e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Copenhague, Danemark, 16-20 septembre 2019 ; pp. 101-109. [Référence croisée]
65. Wilcoxon, F. Comparaisons individuelles par méthodes de classement. Biome. Taureau. 1945, 1, 80-83. [Référence croisée]
66. Vijaymeena, M. ; Kavitha, K. Une enquête sur les mesures de similarité dans l'exploration de texte. Mach. Apprendre. Appl. Int. J. 2016, 3, 19-28. [Référence croisée]
67. Kwieci 'nski, R. ; Melniczak, G. ; Górecki, T. Comparaison des recommandations de tâches en temps réel et par lots. Accès IEEE 2023, 11, 20553-20559. [Référence croisée]
68. Kwieci 'nski, R. ; Gorecki, T. ; Filipowska, A. Importance de l'apprentissage dans les recommandations bipartites basées sur des graphiques. Dans Actes de la 17e Conférence 2022 sur l'informatique et les systèmes de renseignement (FedCSIS), Sofia, Bulgarie, 4-7 septembre 2022 ; pp. 227-233. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Réduction efficace de la dimensionnalité du signal vocal grâce à Techniques à valeur complexe

Sungkyun Ko [1] et Parc Minho 2,*

[1] Département de convergence informatique de l'IA, Université Soongsil, Séoul 06978, République de Corée ;
[2] kosungkyun@naver.com École d'ingénierie électronique, Université Soongsil, Séoul 06978, République de Corée
* Correspondance : mhp@ssu.ac.kr

Résumé : Dans cette étude, nous proposons l'algorithme CVMFCC-DR (Complex-Valued Mel-Frequency Cepstral Co- efficients Dimensionality Reduction) comme méthode efficace pour réduire la dimensionnalité des signaux vocaux. En utilisant la technique MFCC à valeurs complexes, qui prend en compte à la fois les composants réels et imaginaires, notre algorithme permet une réduction de dimensionnalité sans perte d'informations tout en réduisant les coûts de calcul. L'efficacité de l'algorithme proposé est validée par des expériences qui démontrent son efficacité dans la construction d'un modèle de reconnaissance vocale utilisant un réseau neuronal à valeurs complexes. De plus, une méthode d'interprétation softmax à valeurs complexes pour les nombres complexes est introduite. Les résultats expérimentaux indiquent que l'approche donne des performances améliorées par rapport aux techniques traditionnelles basées sur MFCC, soulignant ainsi son potentiel dans le domaine de la reconnaissance vocale.

Mots clés : coefficients cepstraux de fréquence Mel ; correction d'erreurs de réseau neuronal à valeurs complexes ; rétropropagation ; softmax à valeur complexe

check for updates

Citation : Ko, S. ; Park, M. Réduction efficace de la dimensionnalité du signal vocal à l'aide de techniques à valeur complexe. Électronique 2024, 13, 3046. https://doi.org/10.3390/électronique13153046

Rédacteurs académiques : Xin Geng, Padma Iyenghar et Elke Pulvermüller

Reçu : 3 juin 2024
Révisé : 31 juillet 2024
Accepté : 31 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Aujourd'hui, le traitement et la reconnaissance des signaux vocaux jouent un rôle crucial dans divers domaines d'application. Ces technologies sont utilisées à diverses fins, telles que la conversion de commandes vocales en texte ou l'identification du propriétaire d'une voix. Les progrès de la technologie de reconnaissance vocale peuvent améliorer l'interaction homme-machine, améliorant ainsi la productivité et l'efficacité dans diverses industries. Cependant, les signaux vocaux possèdent des formes très diverses et des caractéristiques de grande dimension, ce qui rend leur traitement et leur reconnaissance efficaces un défi persistant. La diversité et la grande dimensionnalité des signaux vocaux rendent difficile la réduction de la dimensionnalité et la reconnaissance des formes, entraînant une augmentation des coûts de calcul. Par conséquent, réduire efficacement la dimensionnalité des signaux vocaux et améliorer les performances des modèles de reconnaissance vocale basés sur les réseaux neuronaux constitue un défi de taille.

Les technologies de traitement et de reconnaissance vocales sont essentielles dans diverses applications, telles que les interfaces vocales, les assistants virtuels et la traduction automatique. L'obtention de résultats de traitement et de reconnaissance des signaux vocaux plus précis et plus efficaces peut améliorer considérablement l'expérience utilisateur des services associés. Par conséquent, des recherches continues sont menées dans le domaine du traitement et de la reconnaissance des signaux vocaux. Les signaux vocaux présentent des caractéristiques de grande dimension, ce qui rend difficile une réduction efficace de la di
De plus, la reconnaissance précise de divers modèles de parole nécessite des modèles de réseaux neuronaux complexes, ce qui, à son tour, augmente les coûts de calcul [1]. Par conséquent, réduire efficacement la dimensionnalité des signaux vocaux sans perte d'informations et améliorer simultanément la précision et l'efficacité des modèles de reconnaissance vocale basés sur les réseaux neuronaux est une tâche cruciale.

Malgré la riche littérature sur les réseaux à valeurs complexes, il existe peu d'exemples de leur application dans le traitement de l'audio ou de la parole. Étant donné que le système auditif humain

Machine Translated by Google

traite le son dans le domaine fréquentiel, il est également utile d'explorer des réseaux neuronaux à valeurs complexes pour le traitement audio plutôt que de s'appuyer uniquement sur des réseaux neuronaux à valeur réelle dans le domaine temporel [2].

Des recherches récentes ont fait des progrès significatifs dans la reconnaissance vocale en combinant des méthodes traditionnelles telles que les coefficients cepstraux de fréquence Mel (MFCC) avec les réseaux de neurones [3]. Bien que la technique MFCC ait été largement utilisée pour l'extraction de caractéristiques vocales, elle présente l' inconvénient de ne pas pouvoir effectuer de réduction de dimensionnalité sans perte, car elle utilise uniquement des valeurs réelles. En d'autres termes, la réduction du nombre de MFCC entraîne une perte d'informations, ce qui diminue la précision de la reconnaissance vocale. Ces méthodes présentent encore une efficacité limitée et des approches améliorées au-delà des méthodes d'apprentissage traditionnelles sont nécessaires.

L'utilisation de la représentation complexe de MFCC permet de prendre en compte à la fois les parties réelles et imaginaires, permettant ainsi une réduction de dimensionnalité sans perte. De plus, l'utilisation de réseaux neuronaux à valeurs complexes peut refléter les changements de phase via des opérations de multiplication complexes [4], représentant mieux les caractéristiques des signaux vocaux. Cette approche devrait permettre une réduction de dimensionnalité et une reconnaissance vocale basée sur un réseau neuronal plus efficaces par rapport aux méthodes existantes.

Dans cette étude, nous proposons l'algorithme CVMFCC-DR pour une réduction efficace et sans perte de la dimensionnalité du signal vocal. En combinant CVMFCC-DR avec des réseaux neuronaux à valeurs complexes, cette technique peut démontrer des performances de reconnaissance vocale supérieures à celles des méthodes existantes.

Les principales contributions de cette étude sont les suivantes :

- Proposer une technique efficace de réduction de dimensionnalité (CVMFCC-DR) utilisant la représentation complexe des MFCC.
- Améliorer les performances de reconnaissance vocale en combinant des MFCC à valeurs complexes et des réseaux neuronaux à valeurs complexes.
- Proposer une nouvelle méthode d'interprétation pour une fonction softmax à valeurs complexes avec entrées complexes.

Cet article commence par présenter la technique MFCC existante et les réseaux de neurones à valeurs complexes. Il fournit ensuite une explication détaillée de l'algorithme CVMFCC-DR proposé et de la méthode d'apprentissage pour les réseaux de neurones à valeurs complexes [5]. Par la suite, l'efficacité de la méthode proposée est validée expérimentalement et les résultats sont analysés. Enfin, l'article se termine par un résumé des résultats de l'étude et suggère des orientations pour de futures recherches.

2. Travaux connexes

Dans le domaine de la reconnaissance vocale, diverses approches et techniques basées sur les réseaux neuronaux sont utilisées. Différents types de réseaux de neurones, tels que les CNN, les RNN, les LSTM et les DNN, sont utilisés, chacun avec ses propres avantages et inconvénients [3]. De plus, des modèles hybrides combinant des méthodes traditionnelles avec des structures de réseaux neuronaux sont également étudiés. Les modèles hybrides peuvent optimiser les performances en combinant les atouts de chaque structure, mais ils présentent également l'inconvénient d'une complexité accrue dans la mise en œuvre et l'interprétation [6].

Au milieu de ces développements, les techniques traditionnelles d'extraction de caractéristiques comme la technique MFCC sont encore largement utilisées comme entrées pour les réseaux de neurones [3]. De plus, l'exploration de nouvelles architectures neuronales telles que les réseaux neuronaux à valeurs complexes pourrait découvrir de nouvelles perspectives et des avancées potentielles dans les capacités de reconnaissance vocale. Récemment, des études ont montré que les FPGA peuvent être utilisés pour améliorer considérablement la vitesse de calcul des nombres complexes [7]. Ces résultats de recherche démontrent empiriquement que la mise en œuvre matérielle d'opérations sur des nombres complexes peut entraîner des améliorations pratiques des performances. De plus, une étude récente a mis en œuvre des réseaux neuronaux à valeur complexe sur des FPGA à des fins de classification, démontrant une précision supérieure par rapport aux réseaux neuronaux à valeur réelle et obtenant des améliorations de vitesse significatives par rapport aux systèmes basés sur CPU [8]. Cela laisse penser qu'à l'avenir, les processeurs qui ne prennent actuellement en charge que les opérations sur des nombres réels pourront un jour prendre également en charge les opérations sur les nombres complexes.

Machine Translated by Google

Sur la base de ces études, l'utilisation de représentations de nombres complexes permet le codage de paires de nombres réels sous forme de nombres complexes uniques, réduisant ainsi de moitié la dimension d'entrée. Cette réduction de dimensionnalité diminue le nombre de paramètres du modèle et améliore l'efficacité des calculs. Par conséquent, des preuves expérimentales montrent que les réseaux de neurones à valeurs complexes peuvent atteindre des performances égales ou supérieures avec moins de paramètres par rapport aux réseaux de neurones conventionnels à valeurs réelles.

Alors que la recherche continue de repousser les limites, une combinaison synergique de méthodes éprouvées et d'approches innovantes pourrait ouvrir la voie à la prochaine génération de systèmes de reconnaissance vocale robustes et performants.

3. Connaissances de base

Diverses études sont menées dans le domaine de la reconnaissance et de la classification de la parole, et dans cette section, nous introduisons les MFCC (coefficients cepstraux mel-fréquence) [3]. La technique MFCC est l'une des méthodes d'extraction de caractéristiques couramment utilisées dans les domaines du traitement du signal vocal et de la reconnaissance vocale. La technique MFCC représente les caractéristiques de fréquence des signaux vocaux et est principalement utilisée pour représenter et reconnaître efficacement les signaux vocaux. Le principe de base de la technique MFCC est illustré dans la figure 1.

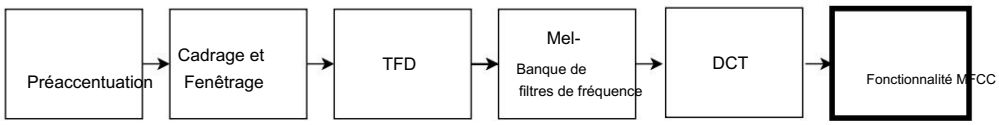


Figure 1. Un aperçu du processus de la technique MFCC.

Préaccentuation : la préaccentuation est essentiellement un filtre passe-haut. En raison de la structure du corps humain, les composantes haute fréquence ont tendance à diminuer dans le son réellement émis lors de la production de la parole. Par conséquent, la préaccentuation est le processus consistant à appliquer un filtre passe-haut pour amplifier en premier les composantes haute fréquence atténuées.

Cadrage et fenêtrage : les signaux vocaux sont divisés en courts segments appelés trames pour analyse. Cela est dû au fait que les caractéristiques de la parole restent relativement stables sur de brèves périodes. Ces images se chevauchent légèrement pour capturer plus efficacement les changements de parole.
Chaque image est traitée à l'aide d'une technique de fenêtre, ce qui améliore l'analyse. Les types de fenêtres courants incluent les fenêtres Hamming et Hanning. Cette méthode de cadrage permet une analyse plus précise de données vocales complexes, ce qui est crucial pour le développement de technologies de reconnaissance et de synthèse vocales. Bien que les détails spécifiques de mise en œuvre puissent varier, ces principes fondamentaux sont largement utilisés dans les systèmes de traitement de la parole.

Transformée de Fourier discrète : pour calculer le spectre de puissance, la DFT (Transformation de Fourier discrète) est utilisée pour calculer le spectre de puissance pour chaque image obtenue précédemment. Ce processus permet de discerner la distribution d'énergie spécifique à la fréquence du signal vocal sur chaque trame.

Banque de filtres Mel-Frequency : Le filtre passe-bande Mel est un ensemble de filtres conçus pour extraire les signaux vocaux de manière non linéaire, imitant le système auditif humain.
Généralement construit avec 40 filtres triangulaires, il analyse les caractéristiques fréquentielles des signaux vocaux.

Transformée en cosinus discrète : La DCT (Transformation en cosinus discrète) exprime une séquence finie de points de données sous la forme d'une somme de fonctions cosinus oscillant à différentes fréquences. Dans le processus MFCC, la DCT est appliquée au banc de filtres Mel pour sélectionner les coefficients d'accélération ou pour séparer la relation en amplitudes log-spectrales du banc de filtres.

La reconnaissance vocale utilisant les MFCC peut être utilisée efficacement dans divers environnements [9], et cette méthode peut atteindre une grande précision lorsqu'elle est combinée avec des modèles d'apprentissage profond. Par conséquent, MFCC constitue un apport crucial pour les modèles d'apprentissage profond pour la reconnaissance vocale [10].

Machine Translated by Google

4. Méthode proposée

Dans cette section, nous proposons une méthode pour effectuer efficacement une réduction de dimensionnalité du signal vocal en utilisant des MFCC à valeurs complexes et des réseaux de neurones à valeurs complex
Un aperçu de l'approche proposée est présenté dans la figure 2. Cette figure illustre l' approche proposée pour la classification vocale à l'aide de réseaux neuronaux à valeurs complexes. Le processus commence par une saisie vocale, suivie d'une extraction de caractéristiques à l'aide de coefficients cepstraux à fréquence Mel (MFCC). Ces caractéristiques sont ensuite soumises à une réduction de dimensionnalité et transformées en représentations à valeurs complexes, ce qui donne lieu à des MFCC à valeurs complexes. Les caractéristiques traitées sont ensuite entrées dans un réseau neuronal à valeurs complexes. Les performances du réseau sont améliorées grâce à la sélection de fonctions d'activation et d'algorithmes d'apprentissage appropriés. En fin de compte, la sortie du réseau neuronal est utilisée à des fins de classification.

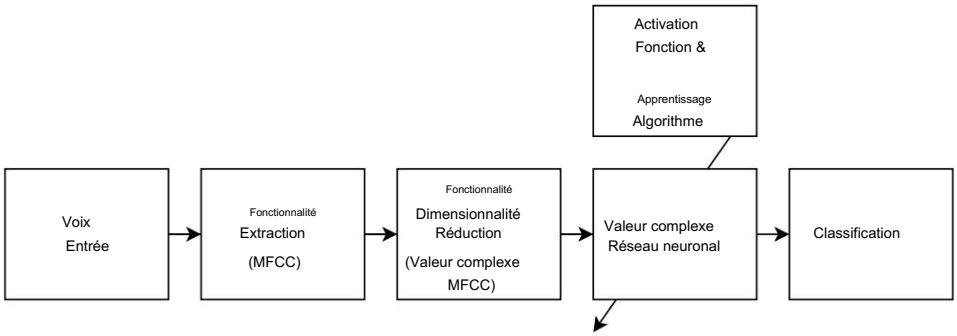


Figure 2. Aperçu de l'approche proposée.

MFCC à valeur complexe : le nombre de MFCC utilisés dans la reconnaissance vocale peut varier en fonction des applications et des modèles spécifiques. Cependant, généralement, des MFCC allant de 13 à 40 sont utilisés. Cette gamme est connue pour fonctionner efficacement dans divers systèmes de reconnaissance vocale. Généralement, un nombre plus élevé de MFCC peut permettre au modèle de capturer plus de détails fréquentiels et spectraux, mais cela augmente également le coût de calcul du modèle. Par conséquent, le nombre sélectionné de MFCC est déterminé en tenant compte d'un équilibre entre l'efficacité de calcul et les performances du modèle.

Pour représenter des problèmes physiques à l'aide de nombres complexes, il existe deux méthodes principales. L'une est une méthode de substitution simple et l'autre est une approche plus élégante connue sous le nom d'équivalence mathématique, comme la transformée de Fourier. La substitution prend deux paramètres physiques réels et en place un dans la partie réelle du nombre complexe et un dans la partie imaginaire. Cela permet aux deux valeurs d'être manipulées comme une seule entité, c'est-à-dire un seul nombre complexe [11]. La méthode proposée pour la réduction de dimensionnalité dans cet article consiste à convertir n valeurs MFCC en nombres complexes. Le premier MFCC est utilisé comme partie réelle et le deuxième MFCC est utilisé comme partie imaginaire du nombre complexe. Par la suite, chaque MFCC alterne entre les parties réelle et imaginaire du nombre complexe. Ce modèle se poursuit jusqu'au nième MFCC, ce qui donne lieu à n/2 nombres complexes. Par exemple, lorsque nous avons n valeurs MFCC, elles pourraient être les suivantes :

$$[x1, x2, x3, x4, \ldots, xn-1, xn]$$

Dans ce cas, le premier MFCC x1 est utilisé comme partie réelle du premier nombre complexe. Le deuxième MFCC x2 est utilisé comme partie imaginaire du premier nombre complexe. Le troisième MFCC x3 est utilisé comme partie réelle du deuxième nombre complexe. Le quatrième MFCC x4 est utilisé comme partie imaginaire du deuxième nombre complexe. Ce modèle continue en alternance entre parties réelles et imaginaires jusqu'au nième MFCC xn, qui devient la partie imaginaire du (n/2)-ième nombre complexe. Par conséquent, avec n valeurs MFCC, n/2 nombres complexes sont générés. Le premier nombre complexe est x1 + jx2, le deuxième nombre complexe

Machine Translated by Google

le nombre est x3 + jx4, et ainsi de suite jusqu'au dernier nombre complexe, qui est xn−1 + jxn. Nous avons illustré cette explication dans la figure 3.

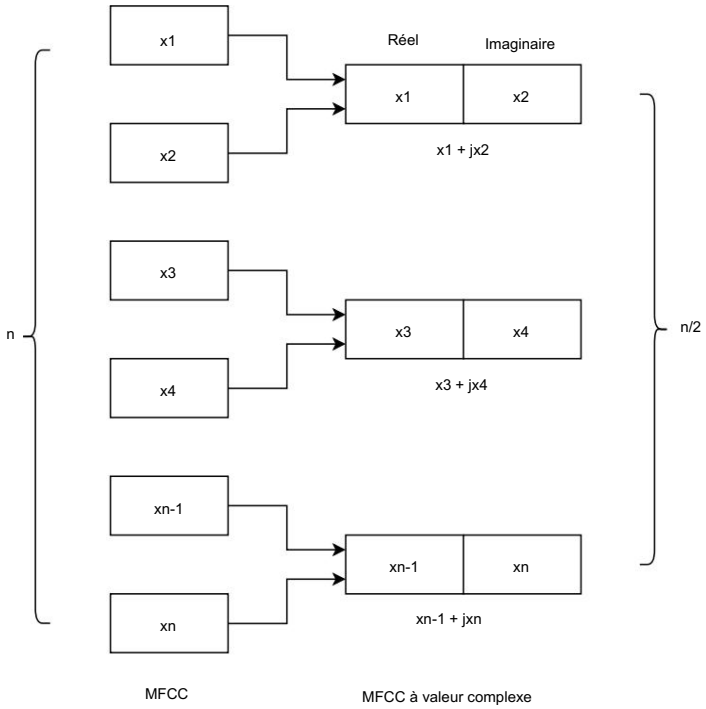


Figure 3. Processus de génération de MFCC à valeurs complexes.

Réseau neuronal à valeur complexe : les réseaux neuronaux à valeur complexe sont des modèles de réseau neuronal qui utilisent des nombres complexes comme valeurs d'entrée ou poids, et ils ont l'avantage de gérer des informations plus riches par rapport aux réseaux neuronaux à valeur réelle. En outre, diverses études de recherche ont été menées dans divers domaines, et des méthodes de réduction de dimensionnalité à valeurs complexes ou de classification et de détection à l'aide de nombres complexes sont utilisées efficacement. Pour cela, la multiplication des entrées complexes et des poids complexes est effectuée, ce qui implique une rotation dans le plan complexe et introduit ainsi des changements de phase [5]. La somme de la multiplication de l'entrée X et du poids W peut être représentée par les équations (1) et (2).

$$Z = W0 + W1X1 + W2X2 + \ldots + WnXn \quad (1)$$

$$Z = \sum n\ Wn \cdot Xn \quad (2)$$

Fonction d'activation et algorithme d'apprentissage : dans les réseaux neuronaux à valeurs complexes, une fonction d'activation dépendante de la phase est utilisée, forçant les informations d'amplitude à être normalisées à un cercle unité de 1 et uniquement l'extraction des informations de phase, comme le montre l'équation (3).

$$P(Z) = \frac{Z}{|Z|} = e^{j \cdot \arg(Z)} \quad (3)$$

L'algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones à valeurs complexes est le suivant. Lorsqu'il existe une cible souhaitée t et une valeur de sortie z, comme le montre la figure 4, les poids sont ajustés selon l'équation (4) pour se déplacer progressivement dans la direction de la cible souhaitée [12].

Machine Translated by Google

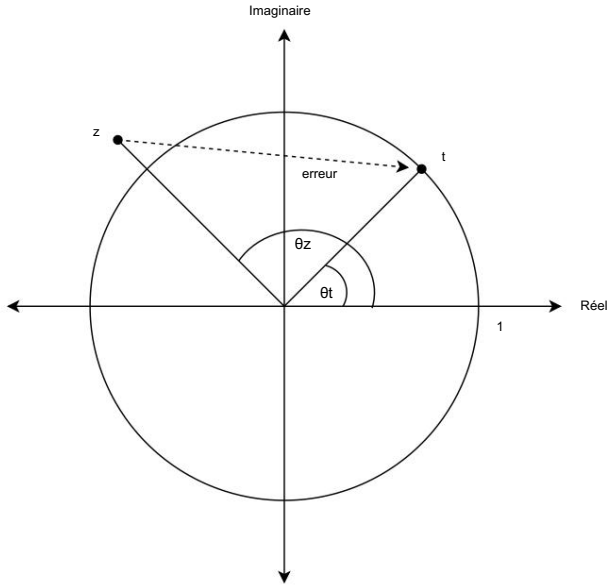


Figure 4. Algorithme d'apprentissage pour CVNN.

$$t = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn \tag{4}$$

L'erreur par rapport à l'objectif d'entraînement t est $e = t - z$, comme le montre l'équation (5).

$$e = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn - \sum n\ (Wn)\cdot Xn = \sum n\ (\Delta Wn)\cdot Xn \tag{5}$$

Pour simplifier et accélérer le calcul de l'erreur par rapport aux changements de poids, en supposant que chaque nœud contribue de manière égale à l'erreur, le symbole de sommation σ est supprimé de l'équation et les deux côtés sont divisés par le nombre de nœuds contributeurs N dans le complexe. réseau neuronal valorisé pour plus de commodité de calcul. L' équation résultante est l'équation (6).

$$\Delta Wn \cdot Xn = \frac{e}{N} \tag{6}$$

Pour obtenir ΔWn afin de modifier les poids, multipliez les deux côtés de l'équation (6) par X_n^{-1}. X_n^{-1} lorsqu'il est multiplié par le conjugué complexe Xn, n étant à la fois le numérateur et le dénominateur ; donc $X_n^{-1} = \frac{\overline{Xn}}{|Xn|^2}$ où $|Xn| = 1$ pour Xn dans l'unité cercle. Donc $X_n^{-1} = \overline{Xn}$, et l'équation (6) est à nouveau dérivée des équations (7) et (8).

$$\Delta Wn \cdot Xn \cdot X_n^{-1} = \frac{e}{N} \cdot X_n^{-1} = \frac{e}{N} \cdot \overline{Xn} \tag{7}$$

$$\Delta Wn = \frac{e}{N} \cdot \overline{Xn} \tag{8}$$

De cette manière, le changement de poids obtenu peut être observé dans l'équation (8). Ce changement représente l'ajustement de poids complexes pour chaque nœud contribuant à l' erreur par rapport à l'objectif de formation et est appliqué uniformément sur l'ensemble du réseau.

Grâce à ce processus, les réseaux neuronaux à valeurs complexes s'ajustent au plus près de la cible en utilisant des fonctions d'activation dépendant de la phase et des algorithmes d'apprentissage efficaces tout en gérant des informations riches grâce à des opérations de multiplication complexes entre les entrées et les poids [13].

Rétropropagation de domaine complexe : lors de l'utilisation de couches cachées, l'erreur de la couche de sortie est rétropropagée aux couches cachées pour calculer la quantité de chaque nœud

Machine Translated by Google

dans les couches cachées ont contribué à cette erreur. Sur cette base, les pondérations entre les couches cachées et de sortie doivent être ajustées de manière appropriée. Ce processus est appelé rétropropagation des erreurs, grâce auquel le réseau neuronal peut ajuster les poids pour minimiser l' erreur dans les valeurs de sortie pendant l'apprentissage. La structure d'un réseau neuronal multicouche à valeurs complexes est illustrée à la figure 5.

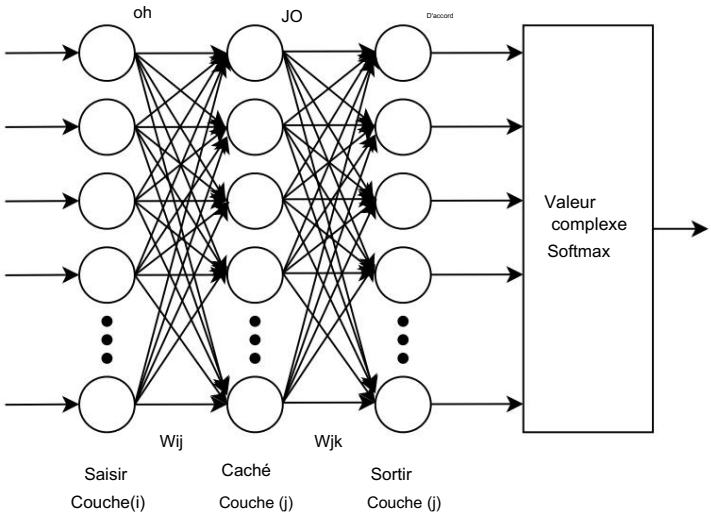


Figure 5. CVNN multicouche.

Dans cet article, une méthode de correction d'erreurs est utilisée pour la couche de sortie k afin de mettre à jour les poids, tandis qu'une méthode de rétropropagation des erreurs est utilisée pour la couche cachée j afin d'examiner son influence sur la sortie. En d'autres termes, la couche de sortie k utilise la méthode de correction d'erreurs pour éviter de tomber dans les minima locaux, tandis que la méthode de rétropropagation des erreurs est appliquée à la couche cachée j pour assurer une meilleure répartition des erreurs de la couche de sortie vers la couche cachée. Cette combinaison de rétropropagation des erreurs dans la couche cachée et de correction des erreurs dans la couche de sortie devrait améliorer le problème du blocage de l'ensemble du réseau neuronal dans les minima locaux tout en permettant une convergence plus rapid
La méthode de rétropropagation des erreurs pour les réseaux de neurones à valeurs complexes est la suivante.

Lors de l'utilisation de la descente de gradient pour les mises à jour de poids dans des réseaux neuronaux à valeurs complexes, le calcul de Wirtinger est utilisé pour différencier des fonctions complexes. Comme les fonctions complexes comprennent des parties réelles et imaginaires, le calcul de Wirtinger effectue une différenciation séparément pour les parties réelles et imaginaires. Pour un nombre complexe z = x + jy défini avec des parties réelles et imaginaires x et y, respectivement, et une fonction complexe f(z) = u(x, y) + jv(x, y), les dérivées de Wirtinger sont définies comme suit [14].

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial f}{\partial x} - j\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial u}\frac{\partial v}{\partial x} + j - j\frac{\partial x}{\partial x}\frac{\partial y}{\partial y}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial f}{\partial x} + j\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial x} + j + j\frac{\partial x}{\partial y}\right) - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (dix)$$

$$+ \frac{\partial f}{\partial z}\frac{\partial f}{\partial \bar{z}}df = \quad (11)$$

Dans ce contexte, $\bar{z}$ désigne le conjugué complexe de z. Dans la méthode dérivée de Wirtinger, les fonctions complexes peuvent être traitées comme des extensions de fonctions réelles en les divisant en parties réelles et imaginaires pour les différencier. Ce qui suit décrit le processus de mise à jour de variables complexes à l'aide de la taille de pas α/2 et de la fonction de perte L.

Machine Translated by Google

$$xn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} \tag{12}$$

$$yn+1 = yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y} \tag{13}$$

En remplaçant zn+1 = xn+1 + j yn+1 dans les équations (12) et (13) , puis en substituant la dérivée de Wirtinger à la fin du processus de dérivation, elle devient la suivante.

$$zn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + j\,yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + jyn - j\,\frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn + jyn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x}\frac{\partial L}{\partial y} + j\,\frac{\partial L}{\partial x}$$

$$1 = zn - \alpha 2\frac{\partial L}{\partial x}\frac{\partial L}{\partial y} + j\,\frac{\partial L}{\partial x}$$

$$= zn - \alpha\,\frac{\partial L}{\partial z} \tag{14}$$

La dérivée partielle de L par rapport au complexe conjugué en tant que dérivée $\frac{\partial L}{\partial z}$ c'est en rapport avec conjuguée de Wirtinger. Cela montre comment la dérivée conjuguée de Wirtinger peut être utilisée pour simplifier la formule de mise à jour pour les variables complexes. En termes d'utilisation de la méthode ci-dessus, la réécriture de l'équation (5) en tant qu'erreur de couche de sortie donne l'équation (15), où tk représente la valeur cible et ok représente la valeur de sortie réelle de la couche de sortie k.

$$ek = tk - ok \tag{15}$$

Et la fonction de perte est définie comme l'équation (16).

$$L = e\,k^2 = |tk - ok|\overline{|tk - ok|} \tag{16}$$

Si les poids sont importants, l'erreur est plus susceptible de se propager aux couches cachées. L'erreur de couche cachée ej peut être exprimée par l'équation suivante.

$$ej = WT_{jk} \cdot ek \tag{17}$$

En utilisant le résultat de l'équation (14), le gradient de la fonction d'erreur par rapport au poids Wij entre la couche d'entrée i et la couche cachée j peut être exprimé comme suit. Ici, oi est la valeur de sortie de la couche d'entrée i et oj est la valeur de sortie de la couche cachée j.

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = \frac{\partial L}{\partial oj} \cdot \frac{\partial oj}{\partial Wij} \tag{18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial Wij}\frac{\partial}{\partial Wij} - ej \cdot P \sum Wij \cdot oi = \tag{19}$$

Machine Translated by Google

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = -ej \cdot P' \cdot \bar{oi} \quad (20)$$

Dans les équations (19) et (20), P représente la fonction d'activation dépendante de la phase utilisée dans la sortie de la couche cachée, et P' est la dérivée de la fonction d'activation dépendante. La mise à jour des poids de la couche cachée peut être exprimée comme suit.

$$\text{nouveau Wij} = \text{ancien Wij} - lr \cdot \frac{\partial L}{\partial Wij} \quad (21)$$

Lorsqu'il s'agit de variables complexes, il est nécessaire d'utiliser $\frac{\partial L}{\partial Wij}$ à la place de $\frac{\partial L}{\partial Wij}$ pour la mise à jour. Ici, lr joue un rôle dans l'ajustement de l'intensité du changement pour éviter les dépassements, et on l'appelle taux d'apprentissage. De plus, la dérivée de la fonction d'activation P est une fonction complexe, et pour trouver la dérivée d'une fonction complexe, la dérivée de Wirtinger est utilisée [15].

Softmax à valeurs complexes : la fonction softmax, qui est utilisée comme fonction d'activation dans la couche de sortie, prend les valeurs d'entrée et normalise chaque valeur entre 0 et 1. Elle garantit que la somme des valeurs normalisées est toujours 1. Cette fonction permet d'interpréter les résultats sous forme de probabilités. Cela peut être exprimé par l'équation (22).

$$\text{Donc f tmax(Z)i} = e\,Zi \sum_{i=1} \frac{e^{Zi}}{n} \quad (22)$$

Cependant, la fonction softmax ne peut interpréter les résultats que sous forme de probabilités pour les entrées de nombres réels, et pour les entrées de nombres complexes, une méthode d'interprétation différente est nécessaire. Dans cet article, nous proposons une méthode d'interprétation softmax à valeurs complexes pour les entrées de nombres complexes. Le résultat de la fonction softmax pour les entrées de nombres complexes produit des valeurs de sortie complexes, et puisque la somme de toutes les valeurs de sortie est 1+0j, nous proposons un algorithme qui calcule la distance entre les valeurs de sortie et 1 + 0j dans le plan complexe et sélectionne l'indice de la valeur la plus proche. Cela peut être exprimé par l'équation (24).

$$\text{distancei} = |\text{So f tmax(Z)i} - \omega| \quad (23)$$

$$\text{index_le plus proche} = \text{argmin (distancei)} \quad (24)$$

Ici, ω = 1 + 0j est défini. Par conséquent, nous décidons de classer le nombre complexe correspondant à close_index en tant que classe 1.

5. Analyse des performances

Dans nos expériences de reconnaissance des signaux vocaux, une comparaison détaillée entre les résultats des réseaux de neurones à valeur réelle et des réseaux de neurones à valeurs complexes a été réalisée. L'analyse des performances a été réalisée parallèlement au prétraitement des coefficients cepstraux de fréquence de Mel (MFCC) à valeurs complexes pour la réduction de la dimensionnalité. De plus, l' impact des MFCC à valeurs complexes sur les résultats de la reconnaissance vocale a été observé. Plus précisément, lors de la reconnaissance de signaux vocaux donnés à l'aide de réseaux neuronaux, l'influence des valeurs MFCC et leur effet de complexification sur les performances du modèle ont été évaluées et comparées afin de déterminer s'il est possible d'améliorer les performances tout en réduisant le nombre de paramètres.

Méthode expérimentale : la figure 6 représente l'architecture d'un réseau neuronal multicouche à valeurs complexes utilisé pour la formation et les tests avec un ensemble de données composé de 8 000 échantillons de parole courts, chacun contenant huit mots différents et durant moins d'une seconde. Les données vocales utilisées dans cette étude font partie de l'ensemble de données de commandes vocales collectées par Google et distribuées sous la licence CC BY.

Machine Translated by Google

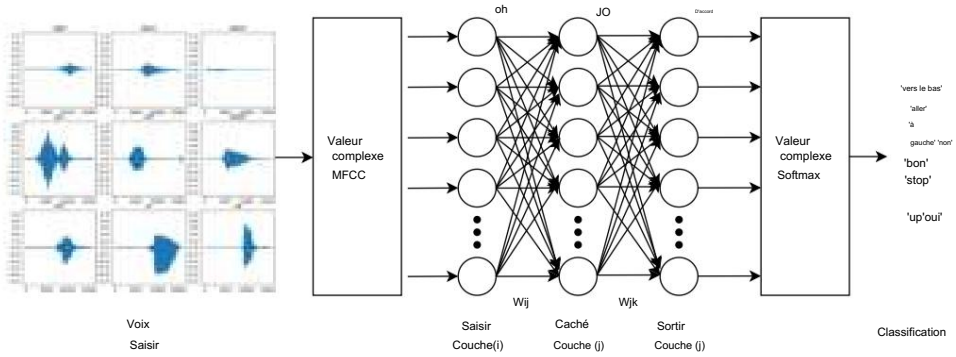


Figure 6. Configuration expérimentale de CVNN multicouche.

Les réseaux de neurones à valeurs complexes sont structurellement similaires aux réseaux de neurones à valeurs réelles, mais la différence réside dans l'utilisation de nombres complexes, qui introduit des changements de phase lorsque la somme des produits entre les entrées et les poids tourne dans le plan complexe. Ces changements de phase jouent un rôle important dans les réseaux de neurones à valeurs complexes. Le réseau neuronal à valeurs complexes se compose d'une couche d'entrée avec des MFCC à valeurs complexes de dimension réduite obtenus à partir des données vocales via le processus de complexification illustré à la figure 3, une couche cachée avec 500 nœuds et une couche de sortie avec 8 nœuds pour classification. Tous les nœuds et poids utilisent des nombres complexes. Les résultats finaux ont été classés au niveau de la couche de sortie. L'ensemble de données comprenait 7 000 échantillons pour la formation et 1 000 échantillons pour les tests. Des clips audio de huit mots ont été utilisés comme données et des expériences ont été menées en divisant les données d'entrée selon que la transformation MFCC à valeurs complexes était appliquée ou non. Dans le cas de l'utilisation de MFCC à valeur réelle, un réseau neuronal à valeur réelle a été utilisé, tandis qu'un réseau neuronal à valeur complexe a été utilisé avec des MFCC à valeur complexe. Les réseaux neuronaux à valeur réelle et à valeur complexe ont été formés dans les mêmes conditions : lr = 0,01, taille du lot = 50 et nombre d'époques = 50. Pour les données d'entrée, les résultats de trois étapes de pré-traitement de réduction de dimensionnalité différentes ont été comparés au réseau neuronal à valeur réelle. Ces étapes de prétraitement comprenaient les dimensions MFCC de 20, 10 et 5. La longueur du signal d'entrée pour le réseau neuronal peut être déterminée comme indiqué dans l'équation (25). Plus précisément, le signal vocal d'entrée a été divisé en 32 trames et des MFCC ont été générés pour chaque trame.

$$\text{La longueur des données du signal d'entrée} = \text{MFCC} \times \text{trames} \tag{25}$$

Par exemple, dans le cas du MFCC 20 à valeur complexe, le MFCC 40 à valeur réelle est calculé en premier. En utilisant l'équation (25), la longueur du signal d'entrée pour le MFCC 40 à valeur réelle devient 40 × 32 = 1280. Si nous convertissons ensuite ces 40 MFCC en nombres complexes, comme illustré sur la figure 3, la réduction de dimensionnalité est obtenue à la moitié de la longueur. , ce qui donne 16 images. Par conséquent, la longueur du signal d'entrée devient 40 × 16 = 640, ce qui équivaut à la longueur du signal d'entrée du MFCC 20 à valeur réelle. Une réduction de dimensionnalité similaire peut être effectuée pour le MFCC 10 à valeur complexe et le MFCC 5 à valeur complexe en utilisant le même procédé. . Le nombre total de paramètres pour l'ensemble du réseau neuronal obtenu grâce à ce processus est présenté dans le tableau 1. Dans ce tableau, I(n) représente le nombre de neurones dans la couche d'entrée, H(n) représente le nombre de neurones dans la couche cachée. couche, et O(n) représente le nombre de neurones dans la couche de sortie.

Tableau 1. Nombre total de paramètres dans le réseau neuronal.

MFCC	MFCC à valeur réelle	MFCC à valeur complexe
20	I(20 × 32 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324 000	I(40 × 16 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324 000
10	I(10 × 32 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164 000	I(20 × 16 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164 000
5	I(5 × 32 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84 000	I(10 × 16 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84 000

Machine Translated by Google

MFCC 20 à valeur complexe par rapport au MFCC 20 à valeur réelle : comme le montre la figure 7, le MFCC 20 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 99,40 % et une précision de test de 84,90 % malgré la même longueur de données d'entrée que la valeur réelle. MFCC 20, qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 98,13 % et une précision de test de 83,10 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

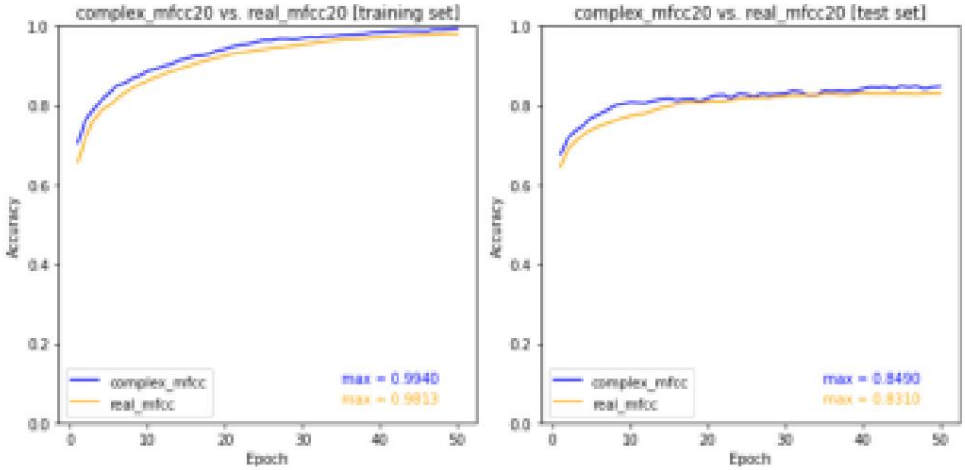


Figure 7. Comparaison des résultats du MFCC 20 à valeur complexe et du MFCC 20 à valeur réelle.

MFCC 10 à valeur complexe par rapport au MFCC 10 à valeur réelle : comme le montre la figure 8, MFCC 10 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 96,90 % et une précision de test de 83,80 % malgré la même longueur de données d'entrée que la valeur réelle. MFCC 10, qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 94,24 % et une précision de test de 81,20 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

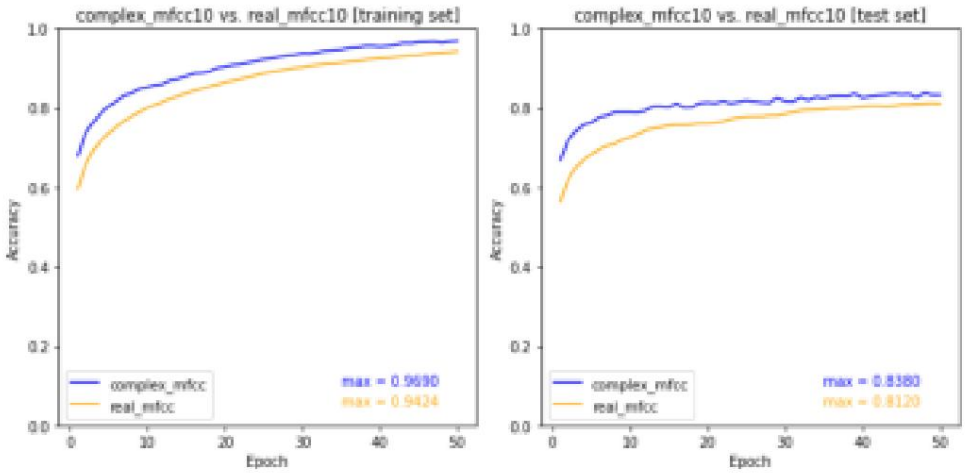


Figure 8. Comparaison des résultats du MFCC 10 à valeur complexe et du MFCC 10 à valeur réelle.

MFCC5 à valeur complexe par rapport à MFCC5 à valeur réelle : comme le montre la figure 9, MFCC 5 à valeur complexe a atteint une précision d'entraînement maximale de 92,33 % et une précision de test de 81,40 % malgré la même longueur de données d'entrée que MFCC 5 à valeur réelle. , qui a atteint une précision d'entraînement maximale de 86,34 % et une précision de test de 74,90 %. Les résultats obtenus à l'aide de MFCC à valeurs complexes ont surpassé ceux obtenus à l'aide de MFCC à valeurs réelles en termes de précision de la formation et des tests.

Machine Translated by Google

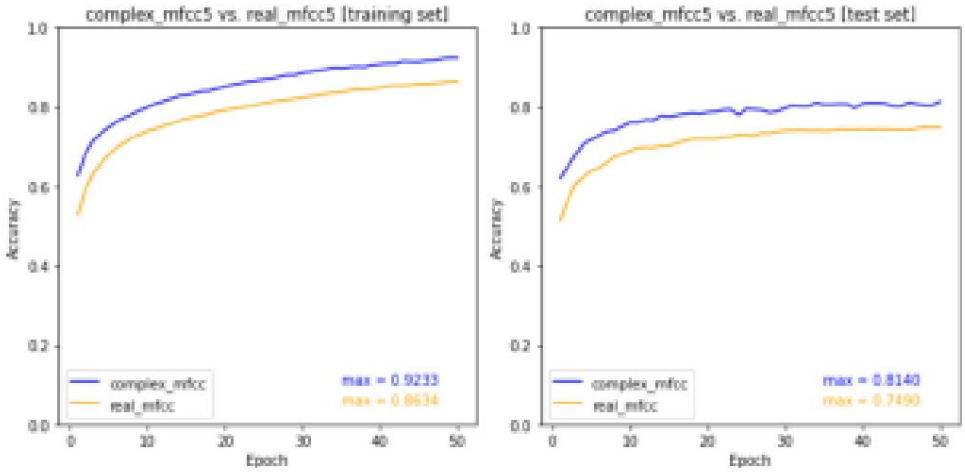


Figure 9. Comparaison des résultats du MFCC 5 à valeur complexe et du MFCC 5 à valeur réelle.

Résultats globaux de l'analyse : après examen des résultats expérimentaux, il a été observé que l'utilisation de MFCC à valeurs complexes donne des performances supérieures à celles de l'utilisation de MFCC à valeur réelle, même avec la même longueur de données d'entrée. Par conséquent, il a été confirmé que l'utilisation de MFCC et de réseaux neuronaux à valeurs complexes conduit à de meilleurs résultats. La variation de précision en fonction du nombre de fonctionnalités MFCC est illustrée dans la figure 10. Bien que cela ne soit pas présenté ici, les mêmes résultats ont été obtenus en utilisant le score F1.

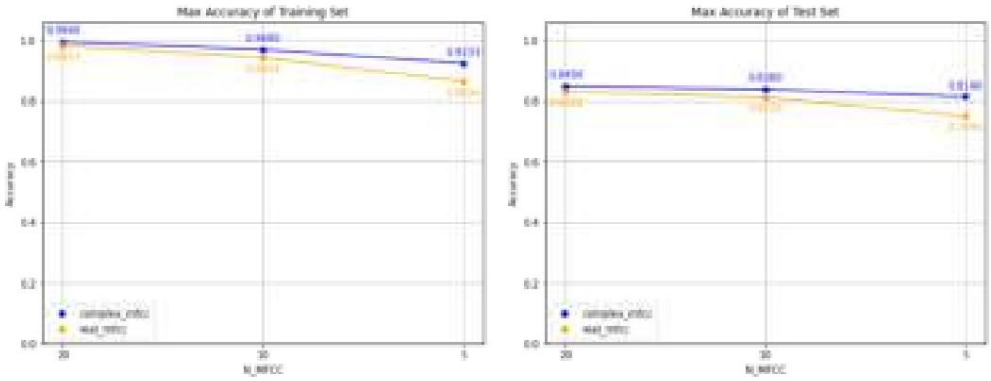


Figure 10. Variation de précision en fonction du nombre de MFCC.

S'il existe un nombre suffisant de MFCC, avec des époques croissantes, il apparaît que les performances utilisant des nombres réels commencent à converger vers celles utilisant des nombres complexes. Cependant, la figure 9 montre un résultat différent. Le MFCC 5 à valeur complexe possède 5 MFCC complexes dimensionnellement réduits obtenus à partir de 10 MFCC grâce au processus de complexification illustré à la figure 3. Un MFCC 5 à valeur réelle avec seulement 5 MFCC ne peut pas rattraper le MFCC 5 à valeur complexe même si les époques augmentent. . En d'autres termes, lorsque le nombre de MFCC est faible, même si les époques augmentent, les résultats des MFCC à valeur réelle ne correspondent pas aux performances des MFCC à valeur complexe. Comme le montre la figure 10, malgré le même nombre de paramètres, les résultats du MFCC 5 à valeur complexe sont supérieurs à ceux du MFCC 5 à valeur réelle. Par conséquent, il a été observé que lors de l'utilisation de MFCC à valeurs complexes, le changement de précision à mesure que le nombre de fonctionnalités MFCC diminue, c'est plus fluide que lors de l'utilisation de MFCC à valeur réelle.

6. Conclusions

Dans cet article, nous avons introduit des réseaux de neurones à valeurs complexes pour résoudre le problème de la reconnaissance vocale. Nos expériences ont utilisé des MFCC à valeurs complexes comme entrées pour un

Machine Translated by Google

réseau neuronal à valeurs complexes. Les résultats ont démontré des performances supérieures lors de l'utilisation de MFCC à valeur complexe, avec un changement de précision plus progressif à mesure que le nombre de fonctionnalités MFCC diminuait, par rapport à l'utilisation de MFCC à valeur réelle. Cela suggère que les MFCC aux valeurs complexes peuvent aider à maintenir les performances avec moins de fonctionnalités. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur le potentiel des réseaux neuronaux à valeurs complexes et démontrent l'efficacité de la combinaison de MFCC à valeurs complexes avec des réseaux neuronaux à valeurs complexes dans la reconnaissance vocale.

Malgré ces résultats prometteurs, nous reconnaissons certaines limites de notre approche . Cette étude a été menée sur un ensemble de données limité, qui ne représente peut-être pas pleinement la diversité des modèles de parole du monde réel. De plus, l'architecture du réseau neuronal complexe décrite dans cette étude est relativement simple et peut ne pas capturer toutes les subtilités des signaux vocaux.

Pour l'avenir, nous souhaitons nous appuyer sur ces travaux pour améliorer encore la précision et les performances des modèles de traitement et de reconnaissance des signaux vocaux. Nos futures recherches se concentreront sur la conception de modèles de réseaux neuronaux à valeurs complexes plus sophistiqués et sur la réalisation d'expériences sur divers ensembles de données pour améliorer les performances. De plus, nous prévoyons d'explorer l'application des réseaux neuronaux à valeurs complexes à d'autres domaines au-delà de la reconnaissance vocale, en élargissant potentiellement leur utilisation dans divers domaines du traitement du signal (16).

Contributions des auteurs : Conceptualisation, SK ; administration de projet, député; supervision, député; rédaction – ébauche originale, SK Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été soutenu conjointement par la Fondation nationale de recherche de Corée (NRF) via une subvention fournie par le gouvernement coréen (MSIT) (subvention n° NRF-2023R1A2C1005461) et par le MSIT (Ministère des sciences et des TIC) de Corée. , dans le cadre du programme de soutien aux entreprises Convergence Security Core Talent Training (IITP-2024-RS-2024-00426853) supervisé par l'IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

Déclaration de disponibilité des données : les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l' article. Des demandes complémentaires peuvent être adressées aux auteurs correspondants.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Tebelskis, J. Reconnaissance vocale à l'aide de réseaux de neurones. doctorat Thèse, École d'informatique, Université Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, États-Unis, 1995.
2. Sarroff, AM Réseaux de neurones complexes pour l'audio. doctorat Thèse, Dartmouth College, Hanover, NH, États-Unis, 2018.
3. Abdul, ZK ; Al-Talabani, AK Mel Frequency Cepstral Coefficient et ses applications : une revue. Accès IEEE 2022, 10, 122136-122158. [Référence croisée]
4. Barrachina, JA; Ren, C. ; Vieillard, G. ; Morisseau, C. ; Ovarlez, JP Théorie et mise en œuvre de neurones à valeur complexe Réseaux. arXiv 2023, arXiv :2302.08286.
5. Aizenberg, I. Réseaux de neurones à valeurs complexes avec neurones à valeurs multiples ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016.
6. Graves, A. ; Jaitly, N. ; Mohamed, AR Reconnaissance vocale hybride avec Deep Bidirectionnel LSTM. Dans Actes de l'atelier IEEE 2013 sur la reconnaissance et la compréhension automatiques de la parole, Olomouc, République tchèque, 8-12 décembre 2013 ; pp. 273-278. [Référence croisée]
7. Paz, P. ; Garrido, M. Implémentation efficace de multiplicateurs complexes sur des FPGA à l'aide de tranches DSP. J. Processus de signal. Système. 2023, 95, 543-550. [Référence croisée]
8. Ahmad, M. ; Zhang, L. ; Chowdhury, MEH Implémentation FPGA d'un réseau neuronal à valeur complexe pour les représentations polaires Classement des images. Capteurs 2024, 23, 2627. [CrossRef] [Pub Med]
9. Anggraeni, D. ; Sanjaya, Wisconsin ; Nurasyidiek, MON ; Munawwaroh, M. La mise en œuvre de la reconnaissance vocale à l'aide des coefficients de cepstre à fréquence Mel (MFCC) et de la méthode de machine à vecteurs de support (SVM) basée sur Python pour contrôler le bras du robot. IOP Conf. Ser. Maître. Sci. Ing. 2018, 288, 012042. [Réf. croisée]
10. Dhanjal, AS ; Singh, W. Une enquête complète sur la reconnaissance automatique de la parole à l'aide des réseaux de neurones ; Springer Nature : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2023.
11. Smith, SW Le guide du scientifique et de l'ingénieur sur le traitement du signal numérique, 2e éd.; Édition technique de Californie : San Diego, Californie, États-Unis, 1999 ; pp. 557-558.
12. Bassey, J. ; Li, X. ; Qian, L. Une enquête sur les réseaux de neurones à valeur complexe. arXiv 2021, arXiv :2101.12249v1.
13. MYONeuralNet. Réseaux de neurones à valeur complexe – Expériences. 2016. Disponible en ligne : http://makeyourownneuralnetwork. blogspot.com/2016/05/complex-valued-neural-networks.html (consulté le 19 février 2021).

Machine Translated by Google

14. Fischer, R. Wirtinger Calcul. Dans Précodage et mise en forme du signal pour la transmission numérique ; John Wiley & Sons, Inc. : Hoboken, NJ, États-Unis, 2002 ; pp. 405-413.
15. PyTorch. Package de différenciation automatique —torch.autograd, sd Disponible en ligne : https://pytorch.org/docs/stable/notes/autograd.html (consulté le 3 novembre 2023).
16. Lee, C. ; Hasegawa, H. ; Gao, S. Réseaux de neurones à valeur complexe : une enquête complète. IEEE/CAA J.Autom. Péché. 2022, 9, 1433-1454. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Recommandations d'emploi : analyse comparative du filtrage collaboratif Méthodes pour les petites annonces

Robert Kwieci'nski 1,2, Tomasz Górecki 2,*, Agata Filipowska 3 et Viacheslav Dubrov 1

1 Groupe OLX, Królowej Jadwigi 43, 61-872 Pozna 'n, Pologne ; r.kwiecinskipl@gmail.com (RK) ; slavadubrov@gmail.com (VD)
2 Faculté de mathématiques et d'informatique, Université Adam Mickiewicz, Uniwersytetu Pozna ´nskiego 4, 61-614 Pozna ´n, Pologne
3 Département des systèmes d'information, Université d'économie et de commerce de Pozna ´n, Al. Niepodległo´sci 10, 61-875 Pozna ´n, Pologne ; agata.filipowska@ue.poznan.pl
* Correspondance : tomasz.gorecki@amu.edu.pl

Résumé : Les petites annonces posent de nombreux défis aux méthodes de recommandation, notamment la visibilité temporaire des publicités, l'anonymat de la plupart des utilisateurs et le fait qu'un seul utilisateur peut généralement consommer un article annoncé. Dans ce travail, nous abordons ces défis en choisissant des modèles et des procédures d'évaluation considérés comme précis, diversifiés et efficaces (en termes de mémoire et de consommation de temps lors de l'entraînement et de la prédiction). Cet article vise à comparer diverses méthodes de recommandation pour les annonces d'emploi, en utilisant OLX Jobs comme exemple, afin d'améliorer le taux de conversion des annonces et la satisfaction des utilisateurs. Dans notre recherche, nous mettons en œuvre des méthodes évolutives et représentons différentes approches des recommandations : Alternating Least Square (ALS), LightFM, Prod2Vec, RP3Beta et Sparse Linear Methods (SLIM). Nous avons effectué des tests A/B en envoyant des millions de messages contenant des recommandations pour effectuer des évaluations en ligne des méthodes sélectionnées. De plus, nous avons publié l'ensemble de données créé pour notre recherche. À notre connaissance, il s'agit du premier ensemble de données de ce type. Il contient 65 502 201 événements effectués sur OLX Jobs par 3 295 942 utilisateurs qui ont interagi avec (affichés, répondu ou ajoutés à leurs favoris) 185 395 offres d'emploi sur deux semaines en 2020. Nous démontrons que RP3Beta, SLIM et ALS fonctionnent nettement mieux que Prod2Vec et LightFM lorsqu'ils sont testés. dans un cadre de laboratoire. Les tests A/B en ligne montrent également que l'envoi de messages contenant des recommandations générées par les modèles ALS et RP3Beta augmente le nombre d'utilisateurs contactant les annonceurs. De plus, RP3Beta a eu un impact 20 % plus significatif sur cette métrique que

Mots clés : recommandations d'emploi ; petites annonces; filtrage collaboratif ; tests d'évolutivité ; Tests A/B ; systèmes de recommandation ; factorisation matricielle; systèmes de recommandation basés sur des graphiques ; Ensemble de données sur les interactions professionnelles OLX ; mesures de diversité

check for updates

Citation : Kwieci 'nski, R. ; Gorecki, T. ; Filipowska, A. ; Dubrov, V. Recommandations d'emploi : analyse comparative des méthodes de filtrage collaboratif pour Petites annonces. Électronique 2024, 13, 3049. https://doi.org/10.3390/électronique13153049

Rédacteurs académiques : Marco Lombardi, Domenico Santaniello, Zilu Liang et Mohammed Khan

Reçu : 30 mai 2024
Révisé : 24 juillet 2024
Accepté : 27 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les petites annonces en ligne sont des sites Web sur lesquels les annonceurs publient des annonces concernant la vente ou la location de services ou de produits [1]. Cet article aborde la publicité en ligne en utilisant l' exemple d'OLX Jobs.

Les petites annonces s'efforcent de répondre aux besoins des annonceurs et des répondants aux publicités en ligne. Pour correspondre à ces groupes, de meilleures méthodes de recommandation deviennent de plus en plus essentielles. Par rapport au commerce électronique traditionnel (par exemple, Amazon (https://www.amazon.com/, consulté le 26 juin 2024) ou eBay (https://www.ebay.com/, consulté le 26 juin 2024)), les petites annonces doivent faire face à différents défis, que nous abordons dans notre procédure d'évaluation. L'une est la visibilité temporelle des publicités, que nous avons décidé de résoudre en reformant fréquemment le modèle. Par conséquent, l'efficacité du modèle, dont nous rendons compte, est essentielle à l'évaluation. Un autre défi est qu'un annonceur n'a généralement besoin que d'un seul utilisateur pour finaliser la transaction.
Cet aspect a été abordé en incluant une analyse de la diversité dans notre évaluation.

Machine Translated by Google

Dans nos recherches, nous nous concentrons sur les approches issues du filtrage collaboratif. Les modèles de filtrage collaboratif ont prouvé leur précision, même s'ils n'utilisent pas d'informations supplémentaires sur les utilisateurs ou les éléments, parfois difficiles à obtenir ou à traiter en pratique. Cet article vise à évaluer différentes méthodes de recommandation à utiliser dans le secteur des petites annonces. La grande rareté de notre ensemble de données, ainsi que le nombre important d'annonces et d'utilisateurs, contribuent à la complexité du problème de recherche.

Ci-dessous, nous listons nos principales contributions.

• Nous évaluons de manière exhaustive des approches de filtrage diverses, évolutives et collaboratives en laboratoire en termes de précision, de diversité et d'efficacité. Nous évaluons l' exactitude pour différents groupes d'utilisateurs, en fonction du nombre d'éléments avec lesquels ils ont interagi, ainsi que d'une analyse statistique des différences. La méthodologie d'évaluation proposée répond aux enjeux majeurs des petites annonces.

• Nous présentons les résultats de deux tests A/B en ligne démontrant l'impact des modèles ALS et RP3Beta sur les utilisateurs d'OLX. Plus d'un million d'utilisateurs ont participé à chaque test. L'impact rapporté peut être utilisé pour estimer l'importance des systèmes de recommandation dans le domaine des petites annonces et permettre à d'autres entreprises de prendre des décisions plus éclairées concernant le développement de tels modèles. • Nous publions
et présentons un ensemble de données sur les interactions professionnelles. A notre connaissance, c'est le plus grand ensemble de données accessible au public sur les interactions professionnelles.

Cet article comprend sept sections. La section 2 est une revue de la littérature sur les développements sous-jacents. La section 3 décrit l'ensemble de données développé et rendu public sur Kaggle. La conception de l'expérience en laboratoire, ainsi que la mise en œuvre des méthodes, sont décrites dans la section 4. La section 5 se concentre sur les résultats de l'évaluation en laboratoire de nos mises en œuvre ainsi que sur l'importance statistique des résultats. La section 6 présente les résultats des implémentations en ligne effectuées lors des tests A/B avec les utilisateurs, ainsi qu'une discussion des résultats. Les conclusions sont présentées dans la section 7.

2. Travaux connexes

Dans cette section, nous commençons par décrire les caractéristiques uniques des petites annonces et des domaines d'emploi. Nous fournissons ensuite un aperçu des systèmes de recommandation. Nous discutons ensuite des facteurs qui influencent notre sélection de modèles et fournissons une description détaillée de chaque modèle. Enfin, nous précisons les lacunes de la recherche.

2.1. Sites de petites annonces

Les sites de petites annonces (petites annonces) sont des versions en ligne des sections publicitaires des journaux, avec des annonces concernant les véhicules, l'immobilier, l'emploi, les animaux de compagnie, etc. Les petites annonces sont un type particulier de site de commerce électronique, car elles ne prennent pas en charge le finalisation des transactions entre les parties : ils sont plutôt utilisés pour communiquer sur le produit ou le service et pour organiser des réunions pendant que la transaction est effectuée hors ligne ; cela les distingue des sites de commerce électronique traditionnels comme eBay ou Amazon [2].

Nos recherches se concentrent sur OLX, qui est présent dans plus de 30 pays à travers le monde.
L'un des types d'annonces publiées sur les petites annonces est celui des offres d'emploi. Dans nos recherches, nous avons identifié plusieurs caractéristiques qui distinguent les offres d'emploi sur les petites annonces des annonces automobiles ou immobilières, par exemple :

• Les exigences d'une annonce indiquent le type d'utilisateur qui peut répondre à l'annonce, et non tous les utilisateurs possèdent les compétences requises.
• Une implication plus intensive de l'utilisateur pendant le processus de recherche, car trouver un emploi est un besoin primordial par rapport, par exemple, à l'achat d'une voiture. •
Le lieu de travail a un impact considérable sur l'utilisateur : pour acheter un téléphone portable ou une voiture, un utilisateur peut voyager ou utiliser un service de colis pour livrer l'article. Néanmoins, un travail nécessite un déménagement s'il est éloigné du domicile de l'utilisateur.
• D'un point de vue technique, une description de poste comporte de nombreux aspects qualitatifs, et selon le poste, les différences peuvent être importantes même entre les annonces d' une même entreprise.

Machine Translated by Google

En plus de ces caractéristiques, au cours de nos recherches, nous avons également identifié les défis suivants pour les méthodes de recommandation sur les petites annonces qui ont influencé notre mise en œuvre des méthodes :

- Le nombre d'utilisateurs et d'offres : avec OLX Jobs, nous avons traité des millions d'utilisateurs et des dizaines de milliers d'offres, toutes deux en constante évolution. • Un utilisateur n'a pas besoin de créer un profil pour interagir avec les publicités, ce qui signifie que les informations d'un profil ne peuvent pas être utilisées à des fins de recommandation et que les recommandations sont déterminées par le comportement de l'utilisateur lors de la visualisation.
- Une annonce a généralement un nombre limité de visiteurs (interagissant avec l'annonce), car une annonce concerne généralement une offre unique. Une fois le besoin satisfait, l'annonce est désactivée. • Il n'y a aucune information indiquant si une transaction a eu lieu ; sur les petites annonces, la conversion concerne la réception d'une réponse à une annonce publiée, toute transaction étant hors ligne.

Ces défis créent des difficultés non seulement pour la mise en œuvre mais également pour tester l'exactitude des méthodes proposées. Nous avons pris en compte ces défis lors de la préparation de l' ensemble de données et de la mise en œuvre et de l'évaluation des méthodes décrites dans cet article.

2.2. Systèmes de recommandation

Il a été démontré que le problème du surchoix [3] peut diminuer la consommation de produits [4] et réduire les revenus du site [5]. Les fournisseurs peuvent demander à leurs utilisateurs des informations supplémentaires sur leurs attentes concernant les articles afin de réduire le nombre de choix présentés. Même si l'utilisateur est prêt à consacrer du temps à fournir ces informations, le nombre de possibilités est généralement trop important pour être présenté à l'utilisateur. Pour résoudre ce problème, de nombreuses entreprises, comme Netflix [6] et Amazon [7], ont créé des systèmes de recommandations personnalisées dont le rôle est de suggérer des éléments pertinents aux utilisateurs [8].

Les recommandations sont utilisées dans plusieurs domaines, notamment la musique, le tourisme, la mode et l'alimentation. De nombreuses études ont été réalisées dans le domaine du commerce électronique [9], des petites annonces [10] et des recommandations d'emploi [11-13]. Li et coll. [14] ont considérablement amélioré leurs recommandations sur LinkedIn en utilisant l'apprentissage par transfert profond pour créer des modèles de compréhension du travail spécifiques à un domaine. Zhu et coll. [15] ont proposé un modèle de recommandation inter-domaines utilisant un graphique hétérogène et un algorithme de détection de communauté pour recommander des cours et des emplois. Lacic et coll. [16] ont évalué différentes architectures d'encodeurs automatiques pour les recommandations de tâches basées sur les sessions et ont présenté les résultats sur des ensembles de données de recommanda

Généralement, nous distinguons deux approches pour fournir des recommandations : les recommandations basées sur le contenu et le filtrage collaboratif [8].

Dans les recommandations basées sur le contenu [17], nous utilisons des informations sur les utilisateurs (par exemple, passe-temps, éducation, compétences) et sur les articles (par exemple, prix, emplacement, catégorie). Ces systèmes utilisent généralement l'historique des interactions (notes, visites, achats et réponses) d'un seul utilisateur mais ne prennent pas en compte les notes de tous les utilisateurs simultanément.

La collecte/le traitement des informations sur les utilisateurs et les éléments n'est pas toujours réalisable. Dans l' approche de filtrage collaboratif [18,19], nous utilisons uniquement les informations sur les interactions des utilisateurs entre les éléments. Même sans informations sur les fonctionnalités des utilisateurs et des articles, ces systèmes peuvent fournir des recommandations très précises. Nous avons choisi cette approche en raison du manque de fonctionnalités utilisateur et de la difficulté de surpasser le filtrage collaboratif en utilisant les fonctionnalités des éléments dans un environnement de production (nous développons cela dans la section 6.3).

L'une des lacunes les plus importantes du filtrage collaboratif est l'impossibilité de fournir des recommandations concernant les utilisateurs et les éléments sans interactions, connue sous le nom de problème de démarrage à froid [20]. Une solution possible pour réduire ce problème est le recyclage fréquent du modèle. Avec de nombreuses interactions utilisateur, cette stratégie nécessite de se concentrer sur l' évolutivité du modèle [21].

Un autre facteur important déterminant le choix du modèle est le type d'interaction entre un utilisateur et un élément [20]. Nous appelons le feedback explicite lorsque l'utilisateur indique explicitement sa préférence pour l'élément (par exemple, en l'évaluant sur une échelle de 1 à 5). Un autre type est celui des commentaires implicites, lorsque nous pouvons uniquement supposer que la préférence de l'utilisateur pour l'élément est basée sur

Machine Translated by Google

sur le comportement des utilisateurs (par exemple, acheter un article ou regarder un film). Le feedback implicite est moins précis, plus abondant et n'exprime généralement que des préférences favorables [22].

Les évaluations en laboratoire des systèmes de recommandation sont généralement basées sur des mesures de précision [23]. Récemment, une grande attention a été accordée à d'autres aspects, tels que la diversité, l'incertitude, la nouveauté et la couverture [24,25]. Avec les petites annonces, un article ne peut généralement être consommé que par un seul utilisateur, nous devons donc éviter de recommander le même article à un nombre important d'utilisateurs. Par conséquent, il est essentiel de se concentrer sur la couverture du catalogue [26] . L'une des tâches les plus difficiles dans l'évaluation des systèmes de recommandation consiste à trouver la métrique hors ligne la plus corrélée à l'objectif en ligne [27].

Dans cet article, nous évaluons des modèles de filtrage collaboratif pour un ensemble de données de rétroaction implicite important . Nous comparons l'exactitude, la diversité et l'efficacité des méthodes de recommandation sélectionnées en laboratoire, puis prouvons la qualité des méthodes lors de tests en ligne avec les utilisateurs.

2.3. Méthodes de recommandation

Ci-dessous, nous énumérons les aspects les plus importants ayant un impact sur la sélection des méthodes pour notre recherche. • Popularité dans la littérature. Nous avons sélectionné des méthodes dont les performances ont été minutieusement évaluées. Toutes les méthodes sélectionnées, sauf une, ont été citées au moins des centaines de fois.

• Popularité dans l'industrie. L'évaluation de cet aspect s'est révélée difficile car les entreprises partagent rarement les résultats des expériences menées. Certains indicateurs de popularité incluent la disponibilité de la mise en œuvre et le nombre de personnes qui l'utilisent (par exemple, reflété dans le nombre d'étoiles et de fourchettes sur GitHub). Nous avons également pris en compte l'expérience des data scientists travaillant au sein de notre entreprise, qui ont déployé la plupart des méthodes sélectionnées pour d'autres cas d'utilisation dans le passé.

•
Évolutivité. Nous n'avons envisagé que des solutions capables de gérer des millions d'utilisateurs et d'articles. De plus, nous avons réduit le problème de démarrage à froid en réentrainant fréquemment le modèle. Nous avons donc dû choisir des techniques à entraîner sur notre ensemble de données en quelques heures.

• Diversité des approches. Nous souhaitions tester des méthodes représentant différentes « familles » pour évaluer leur applicabilité aux petites annonces. Nous avions prévu d'identifier la famille d'approches la plus prometteuse pour poursuivre les recherches dans cette direction.

Enfin, ALS, LightFM, Prod2Vec, RP3Beta et SLIM ont été sélectionnés pour les tests et l'évaluation . Les sous-sections suivantes décrivent les raisons du choix de chaque méthode spécifique et la définition de la méthode. Une limitation courante de ces méthodes est leur incapacité à recommander des éléments qui ne sont visités par aucun utilisateur et à générer des recommandations pour les utilisateurs qui n'ont visité aucun élément (problème de démarrage à froid, [21]). Avec notre ensemble de données, sans fonctionnalités utilisateur et élément, il est impossible de surmonter ce problème par une méthode personnalisée.

Les méthodes sélectionnées ont déjà été comparées dans différents domaines. Anelli et coll. [28] ont comparé RP3Beta, SLIM, ALS et BPRMF (qui équivaut à LightFM lors de l'utilisation de la fonction de perte BPR) sur trois ensembles de données : Amazon Digital Music, Epinions et MovieLens 1M, en termes de précision, de diversité et d'efficacité. Les nombres d'interactions dans ces ensembles de données sont respectivement de 145 523, 300 475 et 571 531. Notre étude a utilisé un ensemble de données contenant des dizaines de millions d'interactions, similaires à celles des systèmes de production OLX.
De plus, nous fournissons les résultats d'une évaluation en ligne.

Dacrema et coll. [29] ont comparé la précision de SLIM, RP3Beta et ALS sur plusieurs ensembles de données (CiteULike-a, MovieLens 1M, Pinterest, Amazon Music, Amazon Movies, Movie- Lens 20M, Netflix, Yelp et Gowalla). Ils ont montré que chacun de ces algorithmes surpassait les deux autres sur au moins un ensemble de données. Certaines de leurs découvertes ont été confirmées sur les ensembles de données MovieLens 1M et Pinterest par Anelli et al. [30]. Zhu et coll. [31] ont comparé BPRMF, SLIM et Prod2Vec sur trois ensembles de données (Amazon Books, Yelp et Gowalla), montrant la supériorité de SLIM. Dong et coll. [32] ont analysé la précision de RP3Beta, SLIM et ALS sur neuf ensembles de données, SLIM fournissant les meilleurs résultats sur huit ensembles de données et ALS.

Machine Translated by Google

sur une. Contrairement à notre étude, ces articles n'ont pas comparé les méthodes sélectionnées en termes de ni la diversité ni l'efficacité, ni mené d'évaluation en ligne.

Récemment, plusieurs méthodes de recommandation basées sur les réseaux de neurones ont été proposé. Il a été démontré que des modèles simples correctement déterminés et réglés les surpasser [28,31-33]. De plus, en raison de la complexité informatique, les modèles basés sur les réseaux de neurones sont moins fréquemment testés sur des ensembles de données contenant des dizaines de millions de interactions [28]. Nous laissons donc aux recherches futures le soin de proposer des solutions plus avancées et des méthodes évolutives qui fournissent des résultats supérieurs sur notre ensemble de données.

2.3.1. Modèles de factorisation matricielle

Les techniques de factorisation matricielle ont été utilisées avec succès dans les systèmes de recommandation depuis le concours Netflix Prize [34]. L'idée principale est de se rapprocher du parc clairsemé matrice d'interaction utilisateur-élément comme produit de deux matrices plus petites et denses. Nous évaluons deux approches de factorisation matricielle : LightFM et ALS.

Le modèle LightFM [35] a été proposé pour surmonter le problème de démarrage à froid des méthodes de factorisation matricielle. Dans notre cas, cela se réduit à une factorisation matricielle classique sans informations sur les utilisateurs et les éléments. Malgré cela, nous avons décidé d'utiliser cette approche en raison de sa mise en œuvre officielle efficace dans la prise en charge de multiples fonctions de perte : logistique, BPR [36], WARP [37] et -OS WARP [38].

Soit U un ensemble d'utilisateurs et I un ensemble d'éléments. Pour un utilisateur U et un élément I donnés, nous définir = 1 si l'utilisateur interagit avec l'élément prédit , et = 0, sinon. Le modèle LightFM le score comme suit :

$$\hat{} = \cdot + +$$,

où et désignent les représentations latentes dimensionnelles de l'utilisateur et de l'élément, et et sont les biais de l'utilisateur et de l'élément. Tous ces paramètres sont appris au cours la formation.

La fonction de perte logistique doit être utilisée lorsque des commentaires positifs et négatifs types sont disponibles, ils sont donc inappropriés pour notre ensemble de données, ce que nous avons confirmé expérimentalement lors du réglage des hyperparamètres.

Les fonctions de perte BPR, WARP et -OS WARP sont des approches d'apprentissage par paire qui sont plus pertinentes pour notre tâche de recommandations principales. Ils essaient de modifier paramètres du modèle pour maximiser la différence entre les scores des items D avec avec lequel l'utilisateur interagit et des éléments D avec lesquels l'utilisateur n'interagit pas.

Plus précisément, dans la fonction de perte BPR [36], nous essayons de maximiser l'expression, comme suit:

$$\sum_{(,,)\ S} \ln(\hat{} \quad ^{-}\ \hat{}) - \Theta\,||\Theta||2\ ,$$

où

$$S = \{(,,) | \ U, \ D \text{ et } \ D\},$$

$$() = \frac{1}{1 + -},$$

$_{\Theta}$ est un paramètre de régularisation spécifique au modèle, Θ est un vecteur de paramètres et || · || est le Norme euclidienne.

Nous présentons WARP [37] comme un cas de -OS WARP [38]. La fonction de perte -OS WARP est une somme de pertes pour chaque utilisateur :

$$\sum_{U} (\hat{}, D),$$

où ˆ est un vecteur de scores estimés ˆ pour chaque élément I.

Machine Translated by Google

Pour un utilisateur donné, , nous classons les éléments en interaction D par ordre décroissant du scores estimés. À savoir, nous classons les éléments comme 1, 2, . . . , | D | , où les indices sont choisi de telle sorte qu'on ait ce qui suit :

$$\hat{}_{1} \geq \hat{}_{2} \geq \ldots \geq \hat{}_{|D|}.$$

Ensuite nous avons le suivant:

$$(\hat{}, ré) = \frac{1}{} \sum_{=1}^{|D|} ( )\Phi(\text{rang}(\hat{})),$$

où rang (ˆ) = I\D (1 + ˆ ≥ ˆ), est une fonction indicatrice, Φ( ) = $\frac{1}{}$, et = ( ) normalise les poids induits par .

En pratique, on échantillonne un item positif concernant la fonction de pondération et choisissez au hasard des éléments invisibles jusqu'à ce que, après les échantillonnages, 1 + ˆ ≥ ˆ . Ensuite, nous effectuons une pas de gradient pour minimiser Φ($\frac{\text{I\D}|}{}$) (1 − + ˆ).

Enfin, la perte -OS WARP est obtenue pour ( ) = 1 et ( ) = 0 si ≠ . La chaîne la perte est obtenue lorsque nous définissons ( ) = 1 pour N. Nous pouvons ignorer la commande des éléments positifs de D pour simplifier les calculs.

Dans notre recherche, toutes les fonctions de perte (logistique, BPR, WARP et -OS WARP) ont été traitées comme hyperparamètres du modèle LightFM et optimisés lors de l'entraînement.

Le modèle ALS (moindres carrés alternés), également connu sous le nom de WRMF – factorisation matricielle régularisée pondérée [39], est un exemple de méthode de factorisation matricielle conçue pour pour les ensembles de données de rétroaction implicite. Nous avons choisi cette méthode en raison de ses performances éprouvées, évolutivité et popularité dans la recherche et l'industrie. De plus, le modèle ALS a déjà été implémenté et utilisé dans OLX.

Nous définissons la confiance d'une observation comme = 1 + , où est un hyperparamètre . Nous définissons également la préférence comme = (> 0). Ensuite, dans ALS, nous optimisons le expression suivante :

$$\min_{,} \sum_{,} (-)^{2} + (\sum || ||2 + \sum || ||2),$$

où est l'intégration dimensionnelle de l'utilisateur, est l'intégration dimensionnelle de l'élément, et est un paramètre de régularisation. Le nom du modèle fait référence à la méthode optimisée pour cette fonction. La procédure des moindres carrés alternés suppose que l'utilisateur ou l'élément est latent les facteurs sont fixes et déterminent analytiquement les autres. La procédure est répétée efficacement quelques fois [39,40].

Dans les approches de factorisation matricielle, l'intégration pour chaque utilisateur est apprise séparément, ce qui peut entraîner une utilisation élevée du temps et de la mémoire si le nombre d'utilisateurs est important. De plus, les recommandations peuvent manquer d'explicabilité car deux utilisateurs disposant du les mêmes interactions peuvent recevoir des recommandations différentes. Autres modèles considérés (SLIM, RP3Beta, Prod2Vec) fournissent le même ensemble de recommandations aux utilisateurs disposant du mêmes interactions.

2.3.2. Modèles basés sur le quartier

Le modèle SLIM (méthodes linéaires clairsemées pour les systèmes de recommandation Top-N [41]) est basé sur la régression des voisins les plus proches basée sur les éléments [8]. Nous avons choisi cette méthode en raison de son avantages par rapport aux modèles de factorisation matricielle et aux voisins les plus proches basés sur les éléments [41] et bonnes performances contre les approches non neuronales et neuronales [29].

Dans ce modèle, nous approchons la matrice utilisateur-élément en apprenant l'élément-élément matrice de similarité clairsemée. Explicitement, s'apprend en minimisant l'expression suivante :

$$\frac{1}{} || - 2 ||2 + \frac{}{|| 2} ||2 + || ||1,$$

Machine Translated by Google

où ≥ 0 et = 0 pour tous , , 1 ≤ , ≤ |Je|, || · || est la norme de Frobenius matricielle :

$$|| \quad || = \sum \sum_{=1}^{|Je|} \sum_{=1}^{|Je|} {}^{2},$$

|| · ||1 est la norme ℓ1 d'entrée :

$$|| \quad ||1 = \sum_{=1}^{|Je|} \sum_{=1}^{|Je|} | \quad |$$

et et sont des paramètres de régularisation.

Nous pouvons voir que chaque colonne de peut être apprise indépendamment, ce qui améliore la évolutivité de ce modèle [41].

Une limitation de cette méthode est qu'elle ne génère pas d'intégrations d'utilisateurs et d'éléments, ce qui pourrait être utile pour d'autres tâches (par exemple, regroupement d'utilisateurs ou d'éléments). Nous pouvons traiter les colonnes de la matrice comme des incorporations d'éléments, mais ce sont des vecteurs ||-dimensionnels clairsemés, ils ne peuvent donc probablement pas être directement utilisés dans d'autres tâches.

2.3.3. Approches basées sur des graphiques

RP3Beta [42] est une approche de filtrage collaboratif basée sur des graphes. De la même manière que Dacrema et al. [29], nous présentons ce modèle comme une extension du modèle P3alpha [43]. Nous considérons un graphe biparti et non orienté = (V, E), où chaque sommet V représente soit un utilisateur, soit un élément et chaque arête { , } E représente l'interaction entre un utilisateur donné et un élément donné. Soit la matrice de contiguïté et la matrice de degrés du graphi Ensuite, les scores de P3alpha sont stockés dans la matrice

$$((\quad {}^{-1} \quad)^{\circ} \quad)^{3},$$

où ◦ désigne la puissance élément par élément d'une matrice (puissance de Hadamard). Plus précisément, le score ˆ est stocké à l'intersection de la ligne représentant l'utilisateur et de la colonne représentant l'item . On peut voir que ce score est une somme des scores attribués aux chemins de longueur 3 reliant l'utilisateur et l'élément dans le graphique.

Dans RP3Beta, le score est calculé avec P3alpha et divisé par la popularité des éléments élevés au pouvoir pour atténuer le biais de popularité.

Nous avons choisi ce modèle en raison de sa simplicité, de son évolutivité et de ses performances éprouvées [29,30], en particulier compte tenu de la grande parcimonie de notre ensemble de données, ce qui réduit considérablement l'utilisation de la mémoire lors de la formation du modèle. Cela nous permet de calculer et de stocker directement la matrice de similarité élément-élément en mémoire au lieu de l'approximation de marches aléatoires proposée dans l'article original.

RP3Beta, similaire à SLIM, ne génère pas d'intégrations d'utilisateurs et d'éléments. Une autre limitation connexe est son incapacité à recommander des éléments dont la distance sur le graphe biparti utilisateur-élément est supérieure à trois par rapport à un utilisateur donné. Plus précisément, l'élément peut être recommandé à l'utilisateur uniquement si au moins un utilisateur ′ a visité l'élément et au moins un des éléments visités par l'utilisateur . De plus, le modèle RP3Beta n'a pas de paramètres optimisés pendant la formation ; par conséquent, il pourrait être incapable d'exploiter les relations complexes dans les données.

2.3.4. Prod2Vec

Le modèle Prod2Vec [44] (ou Item2vec [45]) est basé sur le modèle Word2Vec [46], largement utilisé en traitement du langage naturel. Le modèle se concentre sur l'apprentissage des représentations vectorielles d'éléments en utilisant une séquence d'éléments comme « phrase » et les éléments de cette séquence comme « mots ». Cette méthode a été choisie car elle est évolutive et très différente des méthodes comparées. De plus, cette approche est basée sur le système de recommandation de réseau neuronal profond hybride de pointe actuel utilisé dans d'autres catégories chez OLX.

Machine Translated by Google

Prod2Vec utilise le modèle skip-gram en maximisant la fonction objectif sur l'ensemble S de séquences d'éléments, définies comme suit :

$$= \sum_{S} \sum \sum_{- \le \le \neq 0} \text{journal } P(+ |),$$

où est la longueur du contexte pour les séquences d'éléments, et les éléments de la même séquence sont commandé arbitrairement. La probabilité P(+ |) d'observer un élément voisin + étant donné le l'élément actuel est défini à l'aide de la fonction soft-max :

$$P(+ |) = \frac{\exp(')}{\sum_{=1}^{|Je|} \exp(')},$$

où et sont les représentations vectorielles d'entrée et de sortie de l'élément et ‖| est le , nombre d'éléments uniques dans le vocabulaire. Prod2Vec modélise le contexte d'une séquence d'éléments, où les éléments avec des contextes similaires (c'est-à-dire avec des interactions voisines similaires) ont des représentations vectorielles.

Avant de générer des recommandations, nous normalisons toutes les représentations vectorielles d'entrée, ce qui améliore l'efficacité. Pour générer des recommandations, nous représentons l'utilisateur comme un moyenne des représentations vectorielles d'entrée des éléments en interaction. Ensuite, nous recherchons des éléments dont les représentations d'entrée ont la similarité cosinusoïdale la plus élevée avec la représentation utilisateur (-voisins les plus proches dans l'espace latent).

Une limitation potentielle de cette méthode est une stricte dépendance entre l'utilisateur et l'élément. représentations. Certaines interactions devraient potentiellement avoir un impact plus important que d'autres sur les représentations des utilisateurs (ce qui est possible dans les modèles de factorisation matricielle).

2.4. Lacune en matière de recherche

Cet article vise à comparer différentes méthodes de recommandation dans le domaine des catégories d'emplois, en comblant une lacune spécifique en matière de recherche. Au meilleur de nos connaissances, le Les méthodes de recommandation abordées n'ont jamais été testées ou comparées sur une grande échelle. évoluer tout en travaillant en ligne dans le domaine de l'emploi. Dans ce travail, nous comparons ces méthodes dans un en laboratoire à l'aide de l'ensemble de données que nous avons publié et de tests A/B en ligne effectués dans un environnement de production.

3. Ensemble de données sur les interactions de travail OLX

Cette recherche fournit un ensemble de données commerciales contenant 65 502 201 événements effectués sur OLX Jobs par 3 295 942 utilisateurs qui ont interagi avec 185 395 offres d'emploi en deux semaines en 2020. Nous avons publié l'ensemble de données sur Kaggle (https://www.kaggle.com/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consulté le 26 juin 2024).

Chaque ligne de l'ensemble de données représente l'événement qu'un utilisateur donné effectue concernant un objet donné. annonce à un instant donné (tableau 1). Les événements suivants impliquant les comportements des utilisateurs ont été inclus :

- clic : l'utilisateur a visité la page de détail de l'article ;
- signet : l'utilisateur a ajouté l'élément aux favoris ;
- chat_click : l'utilisateur a ouvert le chat pour contacter le propriétaire de l'élément ;
- contact_phone_click_1 : l'utilisateur a révélé le numéro de téléphone attaché à l'article ;
- contact_phone_click_2 : l'utilisateur a cliqué pour appeler le propriétaire de l'élément ;
- contact_phone_click_3 : l'utilisateur a cliqué pour envoyer un message SMS au propriétaire de l'élément ;
- contact_partner_click : l'utilisateur a cliqué pour accéder à la page externe du propriétaire de l'élément ;
- contact_chat : l'utilisateur a envoyé un message au propriétaire de l'article.

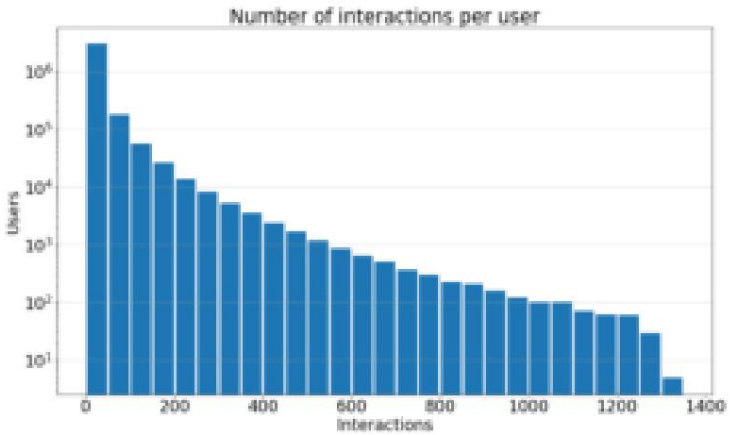
Machine Translated by Google

Tableau 1. Exemples de lignes de l'ensemble de données.

Utilisateur	Article	Événement	Horodatage
1745587	168661	cliquez	1582216025
843008	62838	cliquez	1582485868
14285	30469	sur signet	1582247367
1142944	80122	cliquez	1581805847
2835659	23728	sur chat_click	1582397836

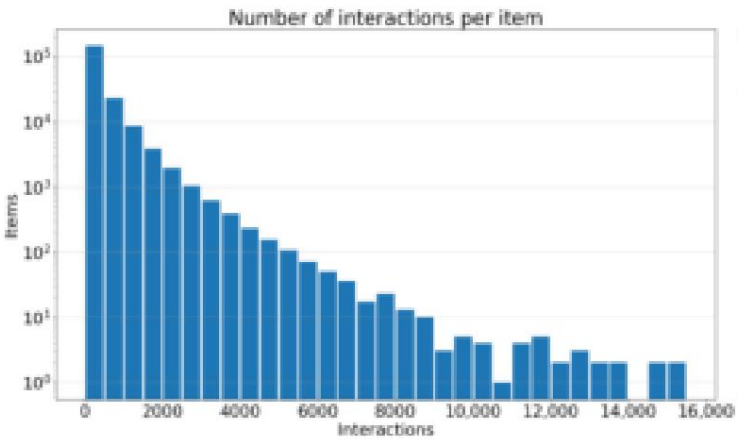
Source : propre étude.

La rareté des données (% d'entrées manquantes dans la matrice utilisateur-élément) est égale à 99,9923 %, ce qui est très faible mais typique des petites annonces (à titre de comparaison, la rareté des données sur le L'ensemble de données MovieLens 20M représente 99,47 %, ce qui le rend presque 70 fois plus dense). Distributions de les interactions par utilisateur, les interactions par élément et les événements sont fournis dans les figures 1 et 2, et tableau 2, respectivement. Nous avons utilisé une échelle logarithmique car les distributions sont fortement biaisé à droite.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	2
0.50	6
0.75	18
0.90	46
0.99	221

Figure 1. Nombre d'interactions par utilisateur. Source : propre étude.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	3
0.50	137
0.75	428
0.90	950
0.99	2944

Figure 2. Nombre d'interactions par élément. Source : propre étude.

Selon De Ruijt et Bhulai [47], les ensembles de données les plus couramment utilisés pour l'évaluation des systèmes de recommandation d'emploi sont CareerBuilder12 (https://www.kaggle.com/concours/recommandation d'emploi, consulté le 16 juin 2024), RecSys16 [12] et Rec-Sys17 [13]. Le tableau 3 montre les statistiques des ensembles de données considérés. Le nombre de uniques les interactions sont le nombre de paires utilisateur-élément uniques avec lesquelles l'utilisateur a interagi avec le article. Même si les chercheurs utilisent les ensembles de données RecSys16 et RecSys17, ils publiés lors de concours de data science dans des conditions strictement limitées et ne sont pas est plus disponible. Par conséquent, nous n'avons pas pu calculer le nombre d'interactions uniques pour ces

Machine Translated by Google

ensembles de données. Nous avons observé que l'ensemble de données sur les interactions professionnelles OLX contient le plus grand nombre de interactions et types parmi les ensembles de données considérés.

Tableau 2. Répartition des événements.

Action	Fréquence (%)
	89.794
cliquez sur	2.628
contact_phone_click_1 signet	2.511
chat_click	2.136
contact_chat	1.448
contact_partner_click	0,701
contact_phone_click_2	0,679
contact_phone_click_3	0,103

Source : propre étude.

Tableau 3. Comparaison entre les ensembles de données de recommandations d'emploi. La lettre indique l'écart type.

	Emplois chez OLX Interactions	CareerBuilder12	RecSys16	RecSys17
Interactions	65,50 M	1,60 M	8,83 M	8,27 M
Interactions uniques	47,17 millions	1,60 M	-	-
Utilisateurs	3,30 M	0,3 2M	1,37M	1,50M
Nombre moyen de uniques interactions par utilisateur	14h31 (= 29,23)	4,99 (= 11,42)	<6,46	<5,51
Articles	0,19 M	0,37 M	1,36 M	1,31 M
Nombre moyen de uniques interactions par élément	254.42 (= 426,02)	4.38 (= 8,19)	<6,50	<6.31
Densité de la matrice d'interaction (%)	0,0077%	0,0014%	<0,0005%	<0,0004%
Types d'interactions	8	1	4	5
Horodatages				
Fonctionnalités utilisateur				
Caractéristiques de l'article				

Source : propre étude.

Il convient de noter que le maintien de la confidentialité des annonces et des utilisateurs était une priorité lors de la préparation de cet ensemble de données. Les mesures prises pour protéger la vie privée comprenaient les suivantes :

- Les identifiants d'origine des utilisateurs et des éléments ont été remplacés par des entiers aléatoires uniques ;
- Un nombre entier constant non divulgué a été ajouté à chaque horodatage ;
- Certaines fractions d'interactions ont été filtrées ;
- Certaines interactions artificielles supplémentaires ont été ajoutées.

4. Configuration expérimentale

4.1. Mise en œuvre

Nous avons mis en œuvre les méthodes mentionnées ci-dessus sur la base des développements précédents. Les détails sur la façon dont nos implémentations diffèrent des approches testées précédemment sont fournies dans le tableau 4. La mise en œuvre des méthodes de reproductibilité des résultats est disponible sur GitHub (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations, accédé le 29 mai 2024).

Machine Translated by Google

Tableau 4. Méthodes réimplémentées pour la recherche.

Méthode	Famille de méthodes	Source	Différence avec le Méthode originale
Factorisation matricielle LightFM		Implémentation basée sur : [48]. Document justificatif : [35].	Aucun
SLA	Factorisation matricielle	Implémentation basée sur : [49]. Documents justificatifs : [39,40].	Aucun
MINCE	Basé sur le quartier	Sources qui ont inspiré notre mise en œuvre : [50,51]. Document justificatif : [41].	Aucun
Basé sur un graphique RP3Beta		Source qui a inspiré notre implémentation : [52]. Documents à l'appui : [29,53].	Exécuté directement calculs sur des matrices clairsemées au lieu d'aléatoires marche à proximité.
Prod2Vec Word2Vec		Implémentation basée sur : [54]. Documents justificatifs : [44,45].	Séquences d'interactions, ordonnées par un horodatage. Représenter l'utilisateur comme une moyenne des représentations des éléments ayant interagi. Nous avons également expérimenté le CBOW (sac continu de mots).

Source : propre étude.

4.2. Objectifs de recherche en laboratoire et de tests en ligne Notre

objectif commercial ultime était d'augmenter le nombre d'utilisateurs postulant à des emplois via OLX Jobs. Pour y parvenir, nous essayons de résoudre un problème de classement ; plus précisément, nous recommandons dix éléments ayant les plus grandes chances de recevoir l'interaction d'un utilisateur donné. La question de trouver une mesure hors ligne la plus corrélée au taux de candidature dans le domaine d'emploi a été examinée par Mogenet et al. [27]. Puisque notre objectif est similaire, nous avons suivi leurs résultats en optimisant pour précision@10 (précision pour les dix premiers éléments recommandés [23]). Cependant, nous rapportons et discutons également d'autres mesures d'exactitude, de diversité et d'efficacité.

Nous nous concentrons sur les utilisateurs qui recherchent activement un emploi en interagissant avec les offres d'emploi. Par conséquent, nous ne considérons pas les utilisateurs sans interactions (utilisateurs à démarrage à froid).

4.3. Fractionnement des données

L'ensemble de données décrit dans la section 3 a été divisé en ensembles de données de formation-validation et de test, comme l'exige la méthodologie de recherche. L'ensemble de tests comprend 20 % des interactions les plus récentes. Cela signifie que sur 14 jours, environ 3 jours ont été inclus dans l'ensemble de tests (voir Figure 3). Cette façon de diviser l'ensemble de données en ensembles de formation et de test est le paramètre le plus réaliste selon Meng et al. [55], qui ont étudié plusieurs stratégies de fractionnement pour évaluer les systèmes de recommandation.

Dans les deux ensembles de données, nous avons également limité le nombre d'interactions aux interactions uniques entre un utilisateur et un élément. Si un utilisateur interagissait plus d'une fois avec un élément, seule la première interaction était comptabilisée et l'horodatage de cette interaction était associé à l'élément. Nous n'avons pas non plus fait de distinction entre les types d'interactions. De plus, deux autres modifications ont été appliquées : seuls les utilisateurs apparaissant dans l'ensemble de données de formation et de validation ont été inclus dans l'ensemble de test (car nous ne pouvions pas fournir de recommandations personnalisées à d'autres utilisateurs sans connaissances supplémentaires à leur sujet), et nous avons filtré tous les utilisateurs. paires d'éléments qui étaient présentes dans l'ensemble de formation (pour éviter de recommander des éléments déjà vus). En conséquence, nous nous sommes retrouvés avec environ 38 millions de lignes dans l' ensemble de formation et de validation et environ 6 millions de lignes dans l'ensemble de test. D'autres statistiques sur ces deux ensembles de données sont présentées dans le tableau 5.

Machine Translated by Google

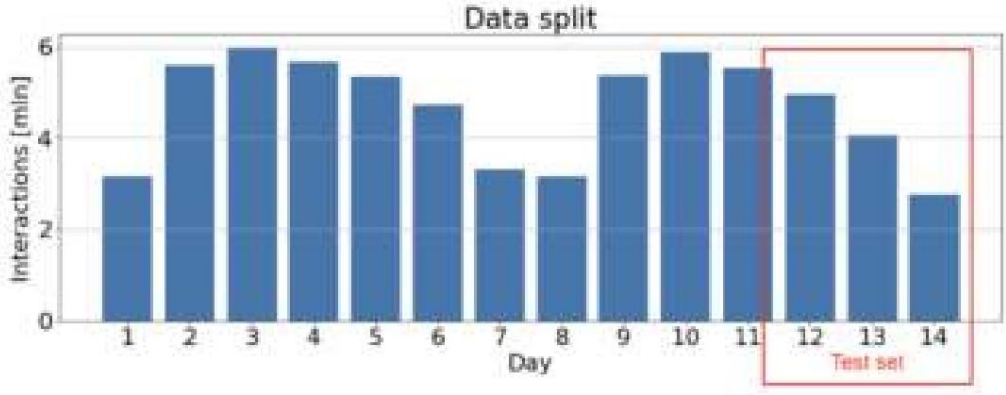


Figure 3. Préparation de l'ensemble de données (divisé en formation-validation et tests, en fonction du nombre de jours). Source : propre étude.

Tableau 5. Comparaison entre les ensembles de formation/validation et de test. La lettre désigne la norme déviation.

	Interactions de travail OLX Interactions	Ensemble de formation et de validation	Ensemble d'essai
Interactions	65,50 M	52,40 M	6,11 M
Interactions uniques	47,17 millions	38,25 M	6,11 M
Utilisateurs	3,30 M	2,83 M	0,62 M
Nombre moyen de uniques interactions par utilisateur	14h31 (= 29,23)	13h50 (= 26.11)	9,87 (= 14,38)
Articles	0,19 M	0,18 M	0,13 M
Nombre moyen de uniques interactions par élément	254.42 (= 426,02)	214.05 (= 365,93)	47.51 (= 83,84)
Densité de la matrice d'interaction (%)	0,0077%	0,0076%	0,0077%

Source : propre étude.

4.4. Réglage du modèle

Par souci de coût et de temps, lors de l'optimisation des paramètres, nous avons fait une restriction à 20% des utilisateurs et 20% des éléments de formation et de validation ensemble. Ensuite, nous divisons l'ensemble de données restreint en ensemble de données de formation-validation avec le règles décrites dans la section ci-dessus. Pour chaque modèle, 100 itérations ont été choisies par optimisation bayésienne utilisant des processus gaussiens implémentés dans scikit-learn (https://scikit-optimize.github.io/stable/modules/generated/skopt.gp_minimize.html, accédé le 29 mai 2024). Le fichier de configuration définit les espaces pour les hyperparamètres et est disponible dans notre référentiel de code (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations/blob/main/src/tuning/config.py, consulté le 29 mai 2024). Par exemple, pour RP3Beta, nous nous nous sommes limités à rechercher et dans l'intervalle [0, 2].

Des recommandations dans le processus d'optimisation ont été préparées pour 30 000 utilisateurs, et comme mentionné ci-dessus, le score d'optimisation utilisé était précision@10. La figure 4 montre le score de précision en fonction des paramètres. Il est visible que la SLA n'était pas très optimisé au sein du processus, mais pour d'autres méthodes, cette optimisation était cruciale pour améliorer la précision. Les hyperparamètres pour tous les modèles sont présentés dans le tableau 6.

Machine Translated by Google

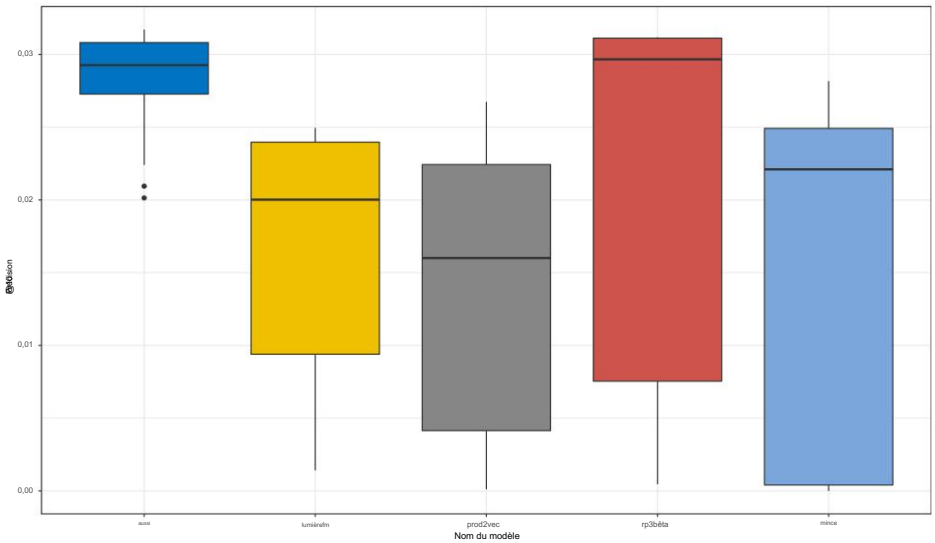


Figure 4. Précision pour chaque modèle, en fonction des paramètres. Source : propre étude.

Tableau 6. Hyperparamètres du modèle.

Modèle	Hyperparamètres du modèle
aussi	{'facteurs' : 357, 'régularisation' : 0,001, 'itérations' : 20, 'event_weights_multiplier' : 63}
lumièrefm	{'no_components' : 512, 'k' : 3, 'n' : 20, 'learning_schedule' : 'adadelta', 'loss' : 'warp', 'max_sampled' : 61, 'epochs' : 11}
prod2vec	{'vector_size' : 168, 'alpha' : 0,028728, 'window' : 20, 'min_count' : 16, 'sample' : 0,002690026, 'min_alpha' : 0,0, 'sg' : 1, 'hs' : 1, 'negative ' : 200, 'ns_exponent' : −0,16447846705441527, 'cbow_mean' : 0, 'époques': 22}
RP3Bêta	{'alpha' : 0,61447198, 'bêta' : 0,1443548}
mince	{'alpha' : 0,00181289, 'l1_ratio' : 0,0, 'itérations' : 3}

Source : propre étude.

4.5. Évaluation du modèle

Nous évaluons nos modèles en termes de précision, de diversité et d'efficacité.

La précision de la méthode de recommandation sur les ensembles de données de rétroaction implicite est généralement évalué en examinant quels éléments de la liste des principales recommandations l'utilisateur interagi avec dans l'ensemble de test [8]. De nombreuses mesures d'évaluation déterminent les mesures de chaque utilisateur séparément et présenter la moyenne comme score d'évaluation final de la méthode [23]. Le Le système de recommandation peut être considéré comme un classificateur, où les interactions de l'utilisateur dans l'ensemble de tests sont des exemples positifs et les principales recommandations sont des éléments classés comme positif par le modèle. Par conséquent, les méthodes utilisées pour évaluer les classificateurs peuvent être directement appliqué aux systèmes de recommandation. Par exemple, la valeur de précision@ pour un utilisateur donné est le nombre d'éléments recommandés avec lesquels l'utilisateur a interagi dans l'ensemble de test divisé par le nombre d'articles recommandés à cet utilisateur. D'autres mesures discutées dans ce travail étaient décrit par Tamm et al. [23].

Dans le domaine des petites annonces, principalement celui des emplois, un seul utilisateur est généralement nécessaire pour effectuer une transaction concernant une annonce donnée. Dans ce cas, la diversité des recommandations est encore plus critique que dans d'autres domaines (comme la musique, les films ou tout autre commerce électronique, hors petites annonces). Pour évaluer cet aspect, nous utilisons trois mesures : couverture des tests, Shannon l'entropie [56] et l'indice de Gini [56]. La couverture des tests fait référence à la fraction des éléments de test recommandé à au moins un utilisateur. Avec l'entropie de Shannon et l'indice de Gini, on ignore éléments en dehors de l'ensemble de test. Une plus grande couverture de test et les valeurs d'entropie de Shannon indiquent une valeur plus élevée diversité, alors que des valeurs plus élevées de l'indice de Gini indiquent une diversité plus faible.

Machine Translated by Google

La dernière étape d'évaluation en laboratoire se concentre sur l'efficacité. A cet effet, nous avons utilisé une instance AWS SageMaker ml.m5.4xlarge équipée de 64 Go de RAM et de 16 vCPU, doté d'un processeur Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL à 2,50 GHz, fonctionnant sur Amazon Linux AMI2018.03. Toutes les méthodes ont été évaluées concernant trois fonctions : le prétraitement des données, Ajustement du modèle et recommandation d'articles. Le temps d'exécution a été calculé pour le temps total nécessaire pour calculer le modèle (en heures). Le pic de mémoire a été calculé en Go, et l'utilisation maximale de la mémoire a été prise en compte lors de l'exécution d'une fonction donnée. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de la bibliothèque tracemalloc (https://docs.python.org/3/bibliothèque/tracemalloc.html, consulté le 29 mai 2024).

5. Évaluation en laboratoire

Cette section décrit l'évaluation en laboratoire des méthodes discutées dans l' ensemble de données développé. Nous avons utilisé les hyperparamètres les plus performants trouvés dans la section précédente. Chaque modèle a été formé sur l'ensemble des données de formation et de validation, et des recommandations ont été produites pour les 619 389 utilisateurs de l'ensemble de tests. Pour mieux présenter les valeurs de Pour chaque métrique hors ligne, nous avons comparé les méthodes décrites avec des méthodes simples et non personnalisées. lignes de base : l'approche produit la plus populaire et les recommandations aléatoires.

5.1. Précision

Tous les indicateurs de cette section prennent en compte les dix premières recommandations, par exemple précision@10, rappel@10. Des valeurs de mesure plus élevées indiquent une meilleure qualité des recommandations. Les valeurs ne doit pas être directement comparé aux résultats obtenus sur d'autres ensembles de données car les métriques dépendent fortement de la distribution de l'ensemble de données (par exemple, une parcimonie élevée) et la stratégie de répartition train/test [55].

5.1.1. Évaluation de la précision

Le tableau 7 présente les résultats de l'évaluation. La plupart des différences observées sont statistiquement significatif en raison du grand nombre d'utilisateurs évalués. Nous développons davantage la signification statistique des résultats de la section 5.1.2.

Tableau 7. Précision : résultats de l'évaluation. Toutes les mesures présentées ont été décrites par Tamm et al. [23]. Pour la métrique mAP, nous avons utilisé la variante avec = min(,).

Métrique RP3Beta SLIM ALS Prod2Vec LightFM Le plus populaire Aléatoire					
précision 0,0484 rappel	0,0472 0,0434 0,0368	0,0359	0,0012	0,00006	
0,0783 ndcg 0,0759	0,0736 0,0657 0,0580	0,0564	0,0012	0,00005	
mAP 0,0393 MRR	0,0721 0,0657 0,0567	0,0545	0,0016	0,00007	
0,1365 LAUC 0,5391	0,0365 0,0329 0,0282	0,0264	0,0006	0,00002	
HR 0,3131	0,1314 0,1230 0,1065	0,1034	0,0038	0,00019	
	0,5368 0,5328 289 0,3066	0,5281	0,5006	0,49999	
	0,2878 0,2537	0,2547	0,0112	0,00059	

Source : propre étude.

Nos approches surpassent largement les recommandations d'articles aléatoires et les plus populaires . La faible performance de l'approche la plus populaire résulte de la nature de petites annonces, principalement le domaine de l'emploi, où les utilisateurs sont principalement intéressés par un spécifique emplacement et catégorie. Construire des systèmes de recommandation plus sophistiqués et personnalisés est raisonnable dans un tel scénario.

Il est démontré que RP3Beta surpasse les autres approches en termes de précision métrique. Nous pensons que cela est lié à la grande rareté de notre ensemble de données. RP3Beta calcule les recommandations de manière déterministe (en exploitant des chemins de longueur trois sur un élément utilisateur graphe biparti). Toutes les autres approches utilisent des techniques d'apprentissage automatique pour trouver les utilisateurs. représentations (ALS, LightFM), représentations d'éléments (ALS, LightFM, Prod2Vec) ou direct similarités élément-élément (SLIM), qui peuvent survenir dans les cas où les utilisateurs ou les éléments ont un faible nombre d'interactions.

Machine Translated by Google

5.1.2. Comparaison statistique pour Precision@10

Nous présentons une comparaison statistique détaillée pour notre principale métrique, précision@10, afin d'identifier les différences entre les méthodes. Pour commencer, nous testons l'hypothèse nulle selon laquelle toutes les méthodes fonctionnent de la même manière et que les différences observées sont simplement aléatoires (test omnibus). Le test de Friedman [57,58] avec l' extension d'Iman et Davenport [59] est probablement le test omnibus le plus populaire, et c'est généralement un bon choix pour comparer plus de cinq algorithmes différents [60,61]. Soit le rang de la ième des méthodes sur la ième des échantillons et

$$= \frac{1}{} \sum_{=1} .$$

Dans notre cas, le nombre d'échantillons, , est le nombre d'utilisateurs dans l'ensemble de test, = 619 389. Le test compare les classements moyens des méthodes et se base sur les statistiques suivantes :

$$= \frac{(- 1)^{2}}{(- 1) - ^{2}},$$

où

$$^{2} = \frac{12}{(+ 1)} \sum_{=1} ^{2} - 3 (+ 1)$$

est la statistique de Friedman, qui a la distribution avec − 1 et (− 1) (− 1) degrés de liberté. La valeur de ce test est égale à 0. La valeur obtenue indique que nous pouvons rejeter en toute sécurité l'hypothèse nulle selon laquelle tous les algorithmes fonctionnent de la même manière. Par conséquent, nous pouvons procéder aux tests post hoc pour détecter des différences significatives par paire entre toutes les méthodes. Demšar [62] propose l'utilisation du test de Nemenyi [63], qui compare tous les algorithmes par paires. Pour un niveau de signification, le test détermine la différence critique (CD). Si la différence entre les classements moyens de deux algorithmes est supérieure à

$$\text{CD} = \sqrt{\quad} \quad (+ 1 6),$$

l'hypothèse nulle que les algorithmes ont les mêmes performances est rejetée (sur la est basé statistique de plage studentisée divisée par √ 2). Demšar [62] a proposé un tracé pour vérifier les différences (le tracé CD visuellement). Les algorithmes non reliés par une ligne peuvent être considérés comme différents dans le tracé.

Dans notre cas, avec une signification = 0,05, deux algorithmes quelconques ayant une différence de un rang moyen supérieur à 0,0114 sera considéré comme inégal (Figure 5).

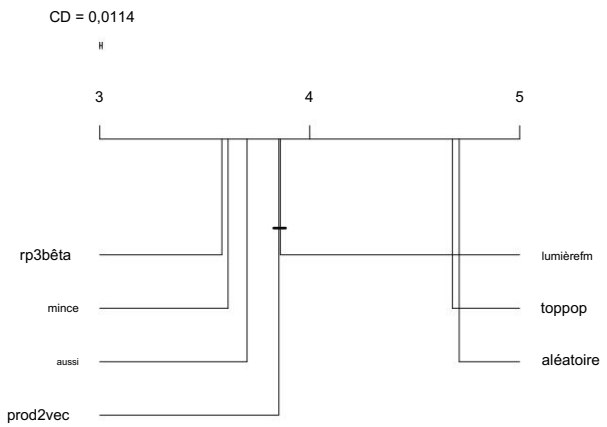


Figure 5. Diagramme de différence critique (pour plus de précision). Source : propre étude.

Machine Translated by Google

5.1.3. Précision pour les utilisateurs avec différents nombres d'interactions

Les seules informations dont nous disposons sur nos utilisateurs sont leurs interactions. Dans la figure 6, nous examinons comment le nombre d'éléments avec lesquels un utilisateur a interagi influence notre principale métrique, précision@10. Nous divisons nos utilisateurs en dix groupes de taille similaire en fonction du nombre d' interactions.

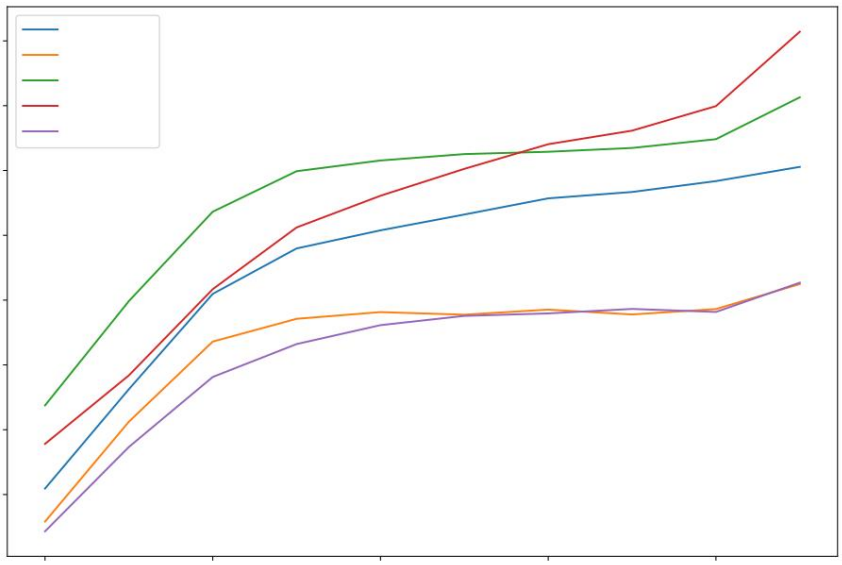


Figure 6. Precision@10 pour chaque modèle, en fonction du nombre d'éléments avec lesquels l'utilisateur a interagi. Il est préférable de le voir en couleur. Source : propre étude.

On voit que l'ordre des modèles triés par précision@10 ne dépend pas du groupe, sauf que SLIM a mieux performé que RP3Beta pour les utilisateurs ayant au moins 22 interactions. La différence est statistiquement significative pour chaque groupe d'utilisateurs (discuté à la section 5.1.4). Le modèle RP3Beta peut être considéré comme un cas particulier de l'approche de filtrage collaboratif basé sur les éléments, qui utilise une mesure de similarité déterministe entre les éléments [64]. D'autre part, SLIM utilise des méthodes d'apprentissage automatique pour découvrir les similitudes.

Nous supposons que ces scores de similarité appris sont moins biaisés mais ont une variance plus élevée, ce qui conduit à de meilleures performances pour les utilisateurs ayant de nombreuses interactions car la moyenne est effectuée sur un nombre plus important de scores.

5.1.4. Évaluation statistique de la précision pour les utilisateurs avec différents nombres d'interactions Dans cette sous-section, nous discutons de la différence entre les modèles RP3Beta et SLIM en fonction du nombre d'interactions utilisateur, comme observé dans la figure 6.

Pour comparer statistiquement deux méthodes sur plusieurs ensembles de données, Demšar [62] recommande le test de Wilcoxon signé-rank [65]. Le test de rang signé de Wilcoxon est une alternative non paramétrique au test apparié, qui classe les différences de performances de deux algorithmes pour chaque ensemble de données, en ignorant les signes. Il compare les rangs des différences positives et négatives.

Le tableau 8 montre que la différence entre les modèles RP3Beta et SLIM est statistiquement significatif pour chaque groupe d'utilisateurs.

Machine Translated by Google

Tableau 8. Résultats du test de rang signé de Wilcoxon entre les modèles RP3Beta et SLIM en fonction du nombre d'éléments avec lesquels l'utilisateur a interagi.

Poubelle	Valeur p
[1,0, 3,0)	0
[3,0, 5,0)	0
[5,0, 8,0)	0
[8,0, 11,0)	0
[11,0, 16,0)	0
[16,0, 22,0)	1,25 × 10−6
[22,0, 31,0)	9,27 × 10−7
[31,0, 45,0)	0
[45,0, 74,0)	0
[74,0, 852,0)	0

Source : propre étude.

5.2. Diversité

Dans le tableau 9, nous pouvons observer que Prod2Vec et LightFM offrent la plus grande diversité après avoir exclu les recommandations aléatoires (qui devraient avoir la plus grande diversité). Le Les diversités des modèles les plus précis, RP3Beta, SLIM et ALS, sont similaires, à l'exception du cas de la faible couverture des tests de la SLA. La relation entre la couverture des tests et la précision @ 10 est illustré à la figure 7.

Tableau 9. Diversité : résultats de l'évaluation.

Métrique	RP3Beta SLIM ALS Prod2Vec LightFM Le plus populaire Aléatoire			
couverture des tests	0,5171 0,3038 0,7400	0,7031 0,0002	0,9778	
0,5725 Shannon 9,5271	9,6728 9,6270 10,4031	10,1385 2,3296	11.7267	
Gini 0,9083	0,9029 0,9120 0,7956	0,8397 0,9999	0,1159	

Source : propre étude.

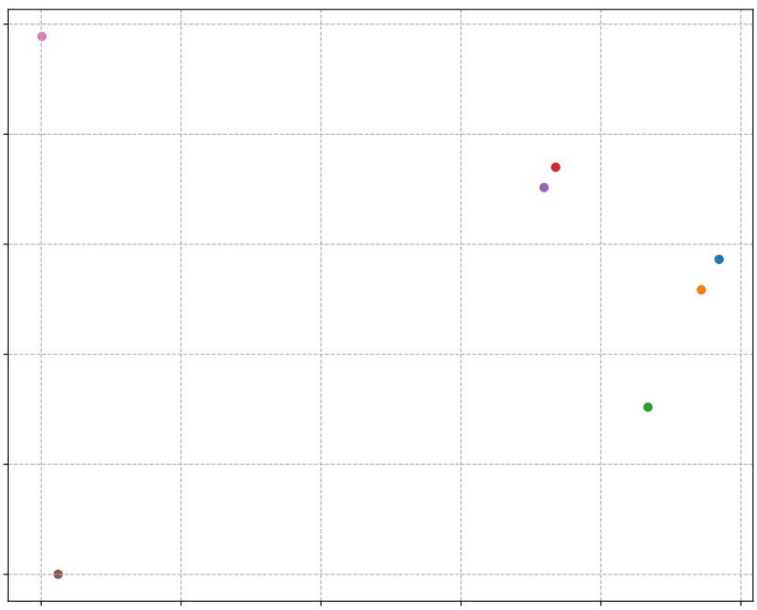


Figure 7. Couverture des tests par rapport à la précision @ 10 pour les modèles considérés. Source : propre étude.

Machine Translated by Google

5.3. Chevauchement des méthodes

Dans nos recherches, nous nous concentrons sur les méthodes qui méritent d'être testées auprès de vrais utilisateurs. Donc, nous avons étudié la superposition des recommandations proposées par les méthodes mises en œuvre concernant les couples utilisateur-élément (Overlap Coefficient [66]). Nous nous attendons à des résultats plus importants différences dans les recommandations lors de la comparaison de méthodes avec un faible chevauchement.

Les résultats de cette expérience sont rapportés dans le tableau 10. RP3Beta et SLIM proposent recommandations similaires. Bien qu'ils soient calculés différemment, ils utilisent un élément clairsemé matrice de similarité. Le groupe de comparaison atteint de SLA présente des similitudes moyennes avec les autres méthodes. Les plus différents du point de vue du chevauchement sont aussi les modèles les plus divers, à savoir Prod2Vec et LightFM. Le faible chevauchement d'ALS et de LightFM souligne le importance du choix de la fonction de perte dans les approches de factorisation matricielle.

Tableau 10. Chevauchement des modèles.

Modèle	RP3Bêta	MINCE	SLA	Prod2Vec	LumièreFM
RP3Beta	100%	73%	53%	37%	38%
SLIM	73%	100%	50%	35%	35%
ALS	53%	50%	100%	38%	37%
Prod2Vec	37%	35%	38%	100%	28%
LightFM	38%	35%	37%	28%	100%

Source : propre étude.

5.4. Évaluation de l'efficacité

Les résultats de l'évaluation de l'efficacité sont présentés à la figure 8. RP3Beta, ALS et LightFM surpasse SLIM et Prod2Vec en termes de temps d'exécution, alors que Prod2Vec nécessite le moins de mémoire. Pour recycler fréquemment le modèle, nous définissons le maximum acceptable temps d'exécution de 3 h, ce qui a été satisfait par ALS, LightFM et RP3Beta. D'un coût Dans une perspective, l'utilisation acceptable de la mémoire a été fixée à 110 Go, ce qui est le cas pour tous les modèles. accompli. Nous pouvons observer que nos modèles pourraient être formés même sur un seul ordinateur portable.

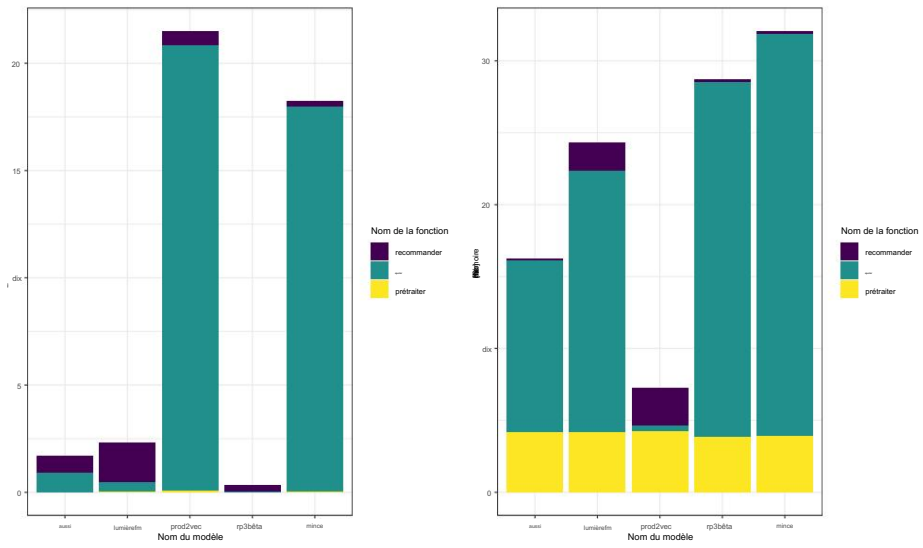


Figure 8. Temps d'exécution et utilisation de la mémoire. Il est préférable de le voir en couleur. Source : propre étude.

5.5. Résumé

Les recherches en laboratoire nous ont permis de sélectionner des modèles à tester en ligne avec OLX utilisateurs. Premièrement, nous avons choisi le modèle RP3Beta pour les tests en ligne car c'est la meilleure approche concernant l'exactitude et le temps d'exécution. La consommation de mémoire relativement élevée est toujours suffisamment bas pour que le modèle puisse être testé en production. Enquêter sur l'impact de cela la diversité relativement faible de la méthode pourrait constituer une voie de recherche future passionnante.

Machine Translated by Google

SLIM est le deuxième meilleur modèle en termes de précision@10. Néanmoins, nous n'avons pas sélectionné cette méthode pour l'évaluation en ligne en raison de sa faible efficacité et de son chevauchement élevé avec le modèle RP3Beta déjà sélectionné. L'amélioration de l'efficacité de la mise en œuvre de SLIM pourrait modifier cette décision.

Entre autres modèles, la plus haute précision@10 est obtenue par ALS. De plus, ALS était déjà implémenté et utilisé pour les recommandations d'emploi chez OLX ; nous avons donc décidé de l'inclure dans la comparaison en ligne.

Même si Prod2Vec et LightFM produisent les recommandations les plus diverses, nous avons décidé de ne pas les tester en ligne en raison de la précision@10 et de l'efficacité nettement inférieures de Prod2Vec.

6. Évaluation en ligne

Pour évaluer l'efficacité des méthodes sélectionnées, nous avons effectué deux tests A/B en ligne auprès des utilisateurs d'OLX Jobs. Nous nous sommes concentrés sur les utilisateurs qui avaient récemment consulté des offres d'emploi sur notre plateforme. Nous leur avons envoyé des e-mails contenant dix offres d'emploi recommandées, et lorsqu'un utilisateur avait installé une application OLX, une notification push avec une offre d'emploi recommandée était également envoyée. Ensuite, nous avons observé si l'utilisateur avait postulé pour un emploi dans les 48 heures suivantes (utilisateur converti).

6.1. Impact du modèle SLA

La première expérimentation visait à répondre à la question : l'introduction de la méthode de recommandation augmente-t-elle le nombre d'utilisateurs postulant à un emploi ? Dans ce test, nous avons divisé les utilisateurs en deux groupes : un groupe témoin sans recommandations et un groupe avec des recommandations générées à l'aide du modèle ALS. Seulement ≈ 10 % des utilisateurs ont été affectés au groupe témoin car le modèle ALS était déjà implémenté et utilisé pour les recommandations d'emploi chez OLX avant le test. Nous avons préféré collecter un échantillon minimal en effectuant un test plus étendu pour observer un impact à plus long terme sur nos utilisateurs. Le test a été réalisé pendant 25 jours en mars 2021. Les résultats sont présentés dans le tableau 11. La signification statistique de l'avantage de l'ALS par rapport au groupe témoin a été examinée à l'aide du test du chi carré et la valeur s'est avérée égale à 0. Cette expérience a confirmé notre hypothèse selon laquelle les recommandations affectent l'activité, puisque le pourcentage d'utilisateurs convertis après avoir reçu une communication a augmenté de manière significative de (16,83 % − 15,98 %)/15,98 % ≈ 5,3 %.

L'augmentation observée se traduit par des centaines d'utilisateurs supplémentaires postulant quotidiennement à des emplois via OLX Jobs.

Tableau 11. Comparaison des activités avec ou sans recommandations.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
contrôle	129 308	15,98%
SLA	1 170 262	16,83%

Source : propre étude.

6.2. Comparaison des modèles ALS et RP3Beta

Dans la deuxième expérience, nous avons vérifié si le meilleur modèle issu des tests en laboratoire surpassait l'ALS. Nous divisons nos utilisateurs en trois groupes, recevant des recommandations de différents systèmes de recommandation : ALS, RP3Beta et une variante mixte. Nous avons généré la moitié des recommandations avec ALS et l'autre moitié avec RP3Beta. La deuxième expérience a été menée pendant 28 jours en mars et avril 2021. Les résultats sont présentés dans le

Le pourcentage d'utilisateurs convertis est calculé ici par rapport à l'ensemble des utilisateurs ; cependant, la modification du système de recommandation n'a pas affecté les utilisateurs qui n'ont pas ouvert le message. Nous avons décidé de les filtrer, car leur comportement ajoutait du bruit inutile à nos données. Le tableau 13 présente l'impact sur les utilisateurs qui ont ouvert le message. L'avantage de RP3Beta sur la SLA est statistiquement significatif (valeur p ≈ 10−6). La différence entre les variantes RP3Beta et ALS+RP3Beta n'est pas statistiquement significative (la valeur p est de 0,19).

Machine Translated by Google

Tableau 12. Comparaison des différentes méthodes de recommandation.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
SLA	343 892	15,25%
RP3Bêta	345 273	15,40%
ALS+RP3Bêta	343 896	15,30%

Source : propre étude.

Tableau 13. Comparaison des différentes méthodes de recommandation pour les utilisateurs ayant ouvert le message.

Une variante	Utilisateurs	% d'utilisateurs convertis
SLA	44 775	19,66%
RP3Bêta	46 097	20,94%
ALS+RP3Bêta	45 469	20,59%

Source : propre étude.

Parmi les utilisateurs qui ont ouvert le message, nous avons observé 1,28 pp (points de pourcentage) plus d'utilisateurs convertis de RP3Beta que d'ALS. Le taux d'ouverture des messages étant de 13,2 %, cela équivaut à une augmentation de 1,28 × 0,132 ≈ 0,17 pp de tous les utilisateurs ciblés. Basé sur Selon les résultats de la première expérience, l'ALS apporte une augmentation de 0,85 pp par rapport au groupe témoin. Cela signifie que le remplacement d'ALS par RP3Beta augmente notre impact sur tous les utilisateurs cibles d'environ 0,17/0,85 = 20 %.

6.3. Discussion

Nous avons prouvé que l'envoi de recommandations d'emploi à partir du modèle ALS augmente la nombre d'utilisateurs répondant aux offres d'emploi de plus de 5 %. De plus, RP3Beta est considérablement surpasse la SLA.

De plus, nous avons effectué un autre test A/B en ligne comparant le modèle RP3Beta avec une variante où nous avons remplacé la moitié des recommandations RP3Beta par des recommandations généré à partir du système de recommandation hybride d'apprentissage profond utilisé chez OLX (https://tech.olx.com/item2vec-neural-item-embeddings-to-enhance-recommendations-1fd948a6f293, consulté le 29 mai 2024). Nous avons décidé de ne pas décrire ce test dans cet article, car ce travail se concentre sur les approches de filtrage collaboratif. Nous souhaitions également que nos résultats restent reproductibles sur l'ensemble de données publié. Malheureusement, nous n'avons pas pu publier toutes les fonctionnalités utilisé par notre modèle interne. Nous n'avons observé aucune amélioration par rapport à RP3Beta, même si le deuxième modèle utilise des connaissances supplémentaires sur les offres d'emploi. Par conséquent, nous a confirmé qu'un modèle simple correctement déterminé et réglé pourrait surperformer davantage solutions profondes avancées. Ceci est cohérent avec les résultats de Dacrema et al. [64] et Anelli et coll. [30], qui ont comparé plusieurs approches non neuronales, dont RP3Beta, avec modèles neuronaux plus avancés.

L'efficacité du modèle RP3Beta permet à OLX Jobs de le former à partir de zéro fois par jour avec des coûts très faibles (sur un CPU). Le filtrage collaboratif de pointe Le modèle des emplois OLX est actuellement utilisé pour générer des e-mails et pousser des recommandations pour nos utilisateurs. Nous avons récemment adapté ce modèle pour fournir des recommandations sur site en temps réel, en tenant compte des interactions récentes des utilisateurs avec les éléments [67]. Nous avons également proposé l'apprentissage P3 pour Rank (P3LTR) [68], une généralisation du RP3Beta, où l'on apprend l'importance des relations utilisateur-élément en fonction des types d'interactions passées utilisateur-élément et des horodatages.

Dans ce travail, nous avons comblé les lacunes de la recherche liées au manque de comparaisons entre approches classiques de filtrage collaboratif dans le domaine professionnel en fournissant des recherche en laboratoire sur un ensemble de données du monde réel et évaluation en ligne auprès de millions d'utilisateurs. De plus, nous avons rendu public le code source pour l'évaluation hors ligne et l'ensemble de données. disponible. Nous encourageons d'autres chercheurs à développer de nouvelles méthodes de recommandation pour aider les utilisateurs à trouver plus rapidement leur emploi idéal.

Les méthodes considérées dans ce travail ne nécessitent que des triplets (utilisateur, élément et horodatage) comme données d'entrée pour la formation et l'évaluation ; par conséquent, ils peuvent être appliqués dans plusieurs domaines,

Machine Translated by Google

même pour des ensembles de données constitués de dizaines de millions d'interactions. Nous nous attendons à de bons résultats dans le domaine des petites annonces sur la base de nos premiers résultats obtenus dans d'autres catégories d'OLX.

7. Résumé

Cet article a abordé le sujet des recommandations d'emploi dans les petites annonces en ligne, en utilisant l'exemple d'OLX Jobs. Nous avons effectué une évaluation approfondie d'approches représentant différentes familles de méthodes de recommandation.

Au cours des recherches en laboratoire, nous avons démontré que RP3Beta, SLIM et ALS fonctionnent nettement mieux que LightFM et Prod2Vec. Nous avons également constaté que Prod2Vec offre la diversité la plus extraordinaire, ce qui peut s'avérer nécessaire lorsqu'on travaille sur la nouveauté des recommandations. De plus, nous avons examiné à quel point les recommandations générées par différents modèles sont similaires.

Nous avons également procédé à une évaluation en envoyant des millions de messages aux utilisateurs en ligne. Des tests A/B ont été réalisés avec ALS et RP3Beta. Les résultats de ces tests ont démontré que l'envoi de recommandations d'emploi générées par ces modèles augmente le nombre d'utilisateurs contactant les annonceurs depuis OLX Jobs. Avec RP3Beta disponible dans l' environnement de production, nous avons amélioré notre efficacité de 20 % (en tenant compte des réactions des utilisateurs).

Lors de l'évaluation des méthodes du point de vue des petites annonces, un modèle recommandant les éléments les plus populaires (encore inédits) n'était pas adapté aux recommandations d'emploi. Un modèle de recommandation basé sur des recommandations aléatoires a également été ajouté à des fins de comparaison afin de démontrer l'avantage des méthodes étudiées.

Un autre résultat important de cette recherche est l'ensemble de données, qui permettra d'approfondir les recherches sur les recommandations pour les besoins classifiés.

L'une des faiblesses de nos travaux est le manque de comparaison avec les réseaux de neurones profonds (DNN) ou les réseaux de neurones graphiques (GNN). Pour de telles méthodes, satisfaire nos contraintes de temps sans infrastructure plus coûteuse (par exemple avec GPU) est un défi. Assouplir nos contraintes ou comparer les DNN ou GNN les plus efficaces serait intéressant pour des travaux futurs. Une autre faiblesse est que la comparaison ne porte que sur un seul ensemble de données. La taille de l'ensemble de données a un impact significatif sur la sélection de la méthode. Il serait intéressant de comparer les mêmes méthodes sur des ensembles de données de différentes tailles, soit des sous-ensembles de l' ensemble de données d'origine, soit d'autres ensembles de données du domaine professionnel (par exemple, provenant de différents marchés sur lesquels OLX opère). De plus, il serait intéressant d'explorer la corrélation entre la diversité et les résultats en ligne, dans le but de développer une mesure hors ligne qui s'aligne mieux sur les objectifs commerciaux.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, RK ; méthodologie, RK et TG ; logiciels, RK et VD ; validation, RK, VD, TG et AF ; analyse formelle, RK et TG ; enquête, RK et TG ; ressources, RK; conservation des données, RK et VD ; rédaction – préparation du projet original, RK, AF et TG ; rédaction – révision et édition, RK, AF et TG ; visualisation, RK et TG ; supervision, TG et AF ; administration du projet, RK Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : ensemble de données : https://www.kaggle.com/datasets/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consulté le 29 mai 2024 ; code source : https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommandations , consulté le 29 mai 2024

Conflits d'intérêts : les auteurs Robert Kwieci 'nski, Agata Filipowska et Viacheslav Dubrov étaient employés par la société OLX Group. L'autre auteur déclare que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Les références

1. Davis, M. Que sont les petites annonces en ligne ? Big Easy Magazine, 4 janvier 2021. 2.
Jones, S. Petites annonces en ligne ; Projet Pew Internet & American Life : Washington, DC, États-Unis, 2009.
3. Gourville, J. ; Soman, D. Surchoix et type d'assortiment : quand et pourquoi la variété se retourne contre lui. Marque. Sci. 2005, 24, 382-395.
[Référence croisée]

Machine Translated by Google

4. Chernev, A. Quand plus c'est moins et moins c'est plus : le rôle de la disponibilité et de l'assortiment de points idéaux dans le choix du consommateur. J. Consommer. Rés. 2003, 30, 170-183. [Référence croisée]

5. Constructeur de bateaux, P. ; Nunes, J. Réduire l'assortiment : une approche basée sur les attributs. J.Marc. 2001, 65, 50-63. [Référence croisée]

6. Gómez-Uribe, C. ; Hunt, N. Le système de recommandation Netflix. ACM Trans. Gérer. Inf. Système. 2015, 6, 1-19. [Référence croisée]

7. Smith, B. ; Linden, G. Deux décennies de systèmes de recommandation sur Amazon.com. Informatique Internet IEEE. 2017, 21, 12-18. [Référence croisée]

8. Aggarwal, CC Recommender Systems : Le manuel, 1ère éd. ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016. 9.

Li, S. ; Karahanna, E. Systèmes de recommandation en ligne dans un contexte de commerce électronique B2C : examen et orientations futures. J. Assoc. Inf. Système. 2015, 16, 72-107. [Référence croisée]

10. Twardowski, B. Modélisation d'informations contextuelles dans des systèmes de recommandation sensibles aux sessions avec des réseaux de neurones. Dans Actes de la 10e conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Boston, MA, États-Unis, 15-19 septembre 2016 ; pp. 273-276. [Référence croisée]

11. Alotaibi, S. Une enquête sur les systèmes de recommandation d'emploi. Int. J. Phys. Sci. 2012, 7, 5127-5142. [Référence croisée]

12. Abel, F. ; Benczur, A. ; Kohlsdorf, D. ; Larson, M. ; Pálovics, R. RecSys Challenge'16 : Actes du Recommender Systems Challenge ; Association pour les machines informatiques : New York, NY, États-Unis, 2016.

13. Abel, F. ; Deldjoo, Y. ; Elahi, M. ; Kohlsdorf, D. RecSys Challenge'17 : Actes du Recommender Systems Challenge 2017 ; Association pour les machines informatiques : New York, NY, États-Unis, 2017.

14. Li, S. ; Shi, B. ; Yang, J. ; Yan, J. ; Wang, S. ; Chen, F. ; Lui, Q. Deep Job Understanding chez LinkedIn. Dans Actes de la 43e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en matière de recherche d'informations, virtuelle, 25-30 juillet 2020 ; pp. 2145-2148. [Référence croisée]

15. Zhu, G. ; Chen, Y. ; Wang, S. Recommandations personnalisées de cours et d'emplois basées sur la communauté graphique avec des données inter-domaines L'intégration. Durabilité 2022, 14, 7439. [CrossRef]

16. Lacic, E. ; Reiter-Haas, M. ; Kowald, D. ; Reddy Dareddy, M. ; Cho, J. ; Lex, E. Utilisation d'encodeurs automatiques pour les recommandations de tâches basées sur les sessions. rendez-vous. Modèle utilisateur. Adaptation utilisateur. Interagir. 2020, 30, 617-658. [Référence croisée]

17. Pazzani, MJ; Billsus, D. Systèmes de recommandation basés sur le contenu. Dans Le Web adaptatif : méthodes et stratégies du Web Personnalisation; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2007 ; pp. 325-341. [Référence croisée]

18. Chen, R. ; Hua, Q. ; Chang, YS; Wang, B. ; Zhang, L. ; Kong, X. Une enquête sur les systèmes de recommandation basés sur le filtrage collaboratif : des méthodes traditionnelles aux méthodes hybrides basées sur les réseaux sociaux. Accès IEEE 2018, 6, 64301-64320. [Référence croisée]

19. Wang, X. ; Lui, X. ; Wang, M. ; Feng, F. ; Chua, Filtrage collaboratif TS Neural Graph. Dans Actes de la 42e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en recherche d'information, Paris, France, 21-25 juillet 2019 ; pp. 165-174. [Référence croisée]

20. Schäfer, JB ; Frankowski, D. ; Herlocker, J. ; Sen, S. Systèmes de recommandation de filtrage collaboratif. Dans Le Web adaptatif ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2007 ; pp. 291-324. [Référence croisée]

21. Takacs, G. ; Pilaszy, I. ; Németh, B. ; Tikk, D. Approches de filtrage collaboratif évolutives pour les grands systèmes de recommandation. J. Mach. Apprendre. Rés. 2009, 10, 623-656. [Référence croisée]

22. Jawaheer, G. ; Szomszor, M. ; Kostkova, P. Comparaison des commentaires implicites et explicites d'un service de recommandation musicale en ligne. Dans Actes du 1er atelier international sur l'hétérogénéité et la fusion de l'information dans les systèmes de recommandation, Barcelone, Espagne, 26 septembre 2010 ; p. 47-51. [Référence croisée]

23. Tamm, YM; Damdinov, R. ; Vasilev, A. Mesures de qualité dans les systèmes de recommandation : calculons-nous les mesures de manière cohérente ? Dans Actes de la quinzième conférence de l'ACM sur les systèmes de recommandation, Amsterdam, Pays-Bas, 27 septembre-1er octobre 2021 ; pp. 708-713. [Référence croisée]

24. Kaminskas, M. ; Bridge, D. Diversité, hasard, nouveauté et couverture : une enquête et une analyse empirique des objectifs au-delà de la précision dans les systèmes de recommandation. ACM Trans. Interagir. Intell. Système. 2016, 7, 1-42. [Référence croisée]

25. Kunaver, M. ; Pozrl, T. Diversité dans les systèmes de recommandation, une enquête. Système basé sur les connaissances. 2017, 123, 154-162. [Référence croisée]

26. Ge, M. ; Delgado-Battenfeld, C. ; Jannach, D. Au-delà de la précision : évaluation des systèmes de recommandation par couverture et par hasard. Dans Actes de la quatrième conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Barcelone, Espagne, 26-30 septembre 2010 ; pp. 257-260. [Référence croisée]

27. Mogenet, A. ; Pham, TAN; Kazama, M. ; Kong, J. Prédire les performances en ligne des systèmes de recommandation d'emploi avec évaluation hors ligne. Dans Actes de la 13e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Copenhague, Danemark, 16-20 septembre 2019 ; pp. 477-480. [Référence croisée]

28. Anelli, VW ; Bellogín, A. ; Di Noia, T. ; Jannach, D. ; Pomo, C. Algorithmes de recommandation Top-N : une quête de l'état de l'art. Dans Actes de la 30e conférence ACM sur la modélisation, l'adaptation et la personnalisation des utilisateurs, Barcelone, Espagne, 4-7 juillet 2022 ; 121-131. [Référence croisée]

29. Dacrema, MF; Boglio, S. ; Crémonesi, P. ; Jannach, D. Une analyse troublante de la reproductibilité et des progrès du système de recommandation Recherche sur les systèmes. ACM Trans. Inf. Système. 2021, 39, 1–49. [Référence croisée]

30. Anelli, VW ; Bellogín, A. ; Di Noia, T. ; Pomo, C. Repenser la comparaison entre le filtrage collaboratif neuronal et la factorisation matricielle. Dans Actes de la quinzième conférence de l'ACM sur les systèmes de recommandation, Amsterdam, Pays-Bas, 27 septembre-1er octobre 2021 ; pp. 521-529. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

31. Zhu, J. ; Dai, Q. ; Su, L. ; Mar.; Liu, J. ; Cai, G. ; Xiao, X. ; Zhang, R. BARS : Vers une analyse comparative ouverte pour les systèmes de recommandation. Dans Actes de la 45e Conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en recherche d'informations, Madrid, Espagne, 11-15 juillet 2022 ; pp. 2912-2923. [Référence croisée]
32. Dong, Y. ; Li, J. ; Schnabel, T. Quand plus récent n'est pas meilleur : l'apprentissage profond profite-t-il vraiment aux recommandations issues des commentaires implicites ? Dans les actes de la 46e conférence internationale ACM SIGIR sur la recherche et le développement en matière de recherche d'informations, Taipei, Taiwan, 23-27 juillet 2023 ; pp. 942-952. [Référence croisée]
33. Anelli, VW ; Malitesta, D. ; Pomo, C. ; Bellogin, A. ; Di Sciascio, E. ; Di Noia, T. Remettre en question le mythe du filtrage collaboratif de graphes : une analyse raisonnée et axée sur la reproductibilité. Dans Actes de la 17e conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Singapour, 18-22 septembre 2023 ; pp. 350-361. [Référence croisée]

34. Koren, Y. ; Cloche, R. ; Volinsky, C. Techniques de factorisation matricielle pour les systèmes de recommandation. Ordinateur 2009, 42, 30-37. [Référence croisée]
35. Kula, M. Intégrations de métadonnées pour les recommandations de démarrage à froid des utilisateurs et des éléments. arXiv 2015, arXiv : 1507.08439.
36. Rendle, S. ; Freudenthaler, C. ; Gantner, Z. ; Schmidt-Thieme, L. BPR : Classement personnalisé bayésien à partir de commentaires implicites. arXiv 2012, arXiv:1205.2618 37. Weston, J. ; Bengio, S. ; Usunier, N.
Wsabie : Passage à l'annotation d'images de grand vocabulaire. Dans Actes de la vingt-deuxième Conférence internationale conjointe sur l'intelligence artificielle, Barcelone, Espagne, 16-22 juillet 2011 ; pages 2764 à 2770.
38. Weston, J. ; Oui, H. ; Weiss, RJ Apprendre à classer les recommandations avec la perte statistique d'ordre K. Dans Actes de la 7e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Hong Kong, Chine, 12-16 octobre 2013 ; pp. 245-248. [Référence croisée]
39. Hu, Y. ; Koren, Y. ; Volinsky, C. Filtrage collaboratif pour les ensembles de données de rétroaction implicite. Dans les actes du huitième IEEE 2008 Conférence internationale sur l'exploration de données, Pise, Italie, 15-19 décembre 2008 ; pp. 263-272. [Référence croisée]
40. Takacs, G. ; Pilaszy, I. ; Tikk, D. Applications de la méthode du gradient conjugué pour le filtrage collaboratif à rétroaction implicite. Dans Actes de la cinquième conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Chicago, Illinois, États-Unis, 23-27 octobre 2011 ; pp. 297-300. [Référence croisée]
41. Ning, X. ; Karypis, G. SLIM : Méthodes linéaires clairsemées pour les systèmes de recommandation Top-N. Dans les actes de la 11e conférence internationale de l'IEEE 2011 sur l'exploration de données, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 11-14 décembre 2011 ; pp. 497-506. [Référence croisée]
42. Christoffel, F. ; Paudel, B. ; Newell, C. ; Bernstein, A. Blockbusters et Wallflowers : recommandations précises, diverses et évolutives avec des marches aléatoires. Dans Actes de la 9e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Vienne, Autriche, 16-20 septembre 2015 ; pp. 163-170. [Référence croisée]

43. Cooper, C. ; Lee, SH; Radzik, T. ; Siantos, Y. Promenades aléatoires dans les systèmes de recommandation : calcul exact et simulations. Dans Actes de la 23e Conférence internationale sur le World Wide Web, New York, NY, États-Unis, 7-11 avril 2014 ; pp. 811-816. [Référence croisée]
44. Grbovic, M. ; Radosavljevic, V. ; Djuric, N. ; Bhamidipati, N. ; Savla, J. ; Bhagwan, V. ; Sharp, D. Le commerce électronique dans votre boîte de réception : recommandations de produits à grande échelle. Dans Actes de la 21e Conférence internationale ACM SIGKDD sur la découverte des connaissances et l'exploration de données, Sydney, NSW, Australie, 10-13 août 2015 ; pages 1809-1818. [Référence croisée]
45. Barkan, O. ; Koenigstein, N. ITEM2VEC : intégration d'éléments neuronaux pour le filtrage collaboratif. Dans les actes du 26e atelier international de l'IEEE 2016 sur l'apprentissage automatique pour le traitement du signal (MLSP), Vietri sul Mare, Italie, 13-16 septembre 2016 ; p. 1 à 6. [Référence croisée]
46. Mikolov, T. ; Sutskever, I. ; Chen, K. ; Corrado, G. ; Dean, J. Représentations distribuées de mots et d'expressions et leur compositionnalité. Dans Actes de la 26e Conférence internationale sur les systèmes de traitement de l'information neuronale — Volume 2, Red Hook, NY, États-Unis, 5-10 décembre 2013 ; pages 3111 à 3119.

47. De Ruijt, C. ; Bhulai, S. Systèmes de recommandation d'emploi : une revue. arXiv 2021, arXiv :2111.13576.
48. Kula, M. LightFM — Référentiel Github. 2023. Disponible en ligne : https://github.com/lyst/lightfm (consulté le 29 mai 2024).
49. Frederickson, B. ALS — Référentiel Github. 2022. Disponible en ligne : https://github.com/benfred/implicit/blob/main/implicit/als.py (consulté le 29 mai 2024).
50. Lévy, M. ; Grisel, O. SLIM — Référentiel Github. 2014. Disponible en ligne : https://github.com/Mendeley/mrec/blob/master/ mrec/item_similarity/slim.py (consulté le 29 mai 2024).

51. Quadrana, M. SLIM — Référentiel Github. 2021. Disponible en ligne : https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Évaluation/blob/master/SLIM_ElasticNet/SLIMElasticNetRecommender.py (consulté le 29 mai 2024).
52. Bernardis, C. RP3Beta — Référentiel Github. 2021. Disponible en ligne : https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Évaluation/blob/master/GraphBased/RP3betaRecommender.py (consulté le 29 mai 2024).
53. Paudel, B. ; Christoffel, F. ; Newell, C. ; Bernstein, A. Recommandations actualisables, précises, diverses et évolutives pour les applications interactives Applications. ACM Trans. Interagir. Intell. Système. 2016, 7, 1–34. [Référence croisée]
54. Reh ˚u ˇrek, R. ; Sojka, P. Cadre logiciel pour la modélisation de sujets avec de grands corpus. Dans Actes de l'atelier LREC 2010 sur les nouveaux défis pour les cadres de PNL, La Valette, Malte, 22 mai 2010 ; pp. 45-50, ISBN 2-9517408-6-7. Disponible en ligne : http://is.muni.cz/publication/884893/en (consulté le 29 mai 2012).

55. Meng, Z. ; McCreadie, R. ; Macdonald, C. ; Ounis, I. Explorer les stratégies de fractionnement des données pour l'évaluation des modèles de recommandation. Dans Actes de la 14e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, virtuelle, 22-26 septembre 2020 ; pp. 681-686. [Référence croisée]
56. Shani, G. ; Gunawardana, A., Évaluation des systèmes de recommandation. Dans le manuel des systèmes de recommandation ; Springer : Boston, MA, États-Unis, 2011 ; pp. 257-297. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

57. Friedman, M. L'utilisation des rangs pour éviter l'hypothèse de normalité implicite dans l'analyse de la variance. Confiture. Stat. Assoc. 1937, 32, 675-701. [Référence croisée]
58. Friedman, M. Une comparaison de tests alternatifs de signification pour le problème des classements. Anne. Mathématiques. Stat. 1940, 11, 86-92. [Référence croisée]
59. Iman, RL; Davenport, JM Approximations de la région critique de la statistique de Friedman. Commun. Méthodes de théorie statistique 1980, 9, 571-595. [Référence croisée]
60. García, S. ; Herrera, F. Une extension sur les « Comparaisons statistiques de classificateurs sur plusieurs ensembles de données » pour toutes les comparaisons par paires. J. Mach. Apprendre. Rés. 2008, 9, 2677-2694.
61. García, S. ; Fernández, A. ; Luengo, J. ; Herrera, F. Tests non paramétriques avancés pour des comparaisons multiples dans la conception d'expériences en intelligence informatique et en exploration de données : analyse expérimentale de la puissance. Inf. Sci. 2010, 180, 2044-2064. [Référence croisée]
62. Demšar, J. Comparaisons statistiques de classificateurs sur plusieurs ensembles de données. J. Mach. Apprendre. Rés. 2006, 7, 1–30.
63. Nemenyi, P. Comparaisons multiples sans distribution. doctorat Thèse, Université de Princeton, Princeton, NJ, États-Unis, 1963.
64. Dacrema, MF; Crémonesi, P. ; Jannach, D. Faisons-nous vraiment beaucoup de progrès ? Une analyse inquiétante des récentes approches de recommandation neuronale. Dans Actes de la 13e Conférence ACM sur les systèmes de recommandation, Copenhague, Danemark, 16-20 septembre 2019 ; pp. 101-109. [Référence croisée]
65. Wilcoxon, F. Comparaisons individuelles par méthodes de classement. Biome. Taureau. 1945, 1, 80-83. [Référence croisée]
66. Vijaymeena, M. ; Kavitha, K. Une enquête sur les mesures de similarité dans l'exploration de texte. Mach. Apprendre. Appl. Int. J. 2016, 3, 19-28. [Référence croisée]
67. Kwieci 'nski, R. ; Melniczak, G. ; Górecki, T. Comparaison des recommandations de tâches en temps réel et par lots. Accès IEEE 2023, 11, 20553-20559. [Référence croisée]
68. Kwieci 'nski, R. ; Gorecki, T. ; Filipowska, A. Importance de l'apprentissage dans les recommandations bipartites basées sur des graphiques. Dans Actes de la 17e Conférence 2022 sur l'informatique et les systèmes de renseignement (FedCSIS), Sofia, Bulgarie, 4-7 septembre 2022 ; pp. 227-233. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Blockchain et chiffrement homomorphe pour la sécurité des données et Confidentialité statistique

Rahul Raj 1,*, Ye¸sem Kurt Peker [1] et Zeynep Delal Mutlu [2]

1 École d'informatique TSYS, Columbus State University, Columbus, GA 31907, États-Unis ; peker_yesem@columbusstate.edu
2 Chercheur indépendant, 1200 Bruxelles, Belgique ; zeynepdelalmutlu@gmail.com *
Correspondance : raj_rahul@students.columbusstate.edu

Résumé : Cette étude propose un système basé sur la blockchain qui utilise un cryptage entièrement homomorphique pour assurer la sécurité des données et la confidentialité statistique lorsque les données sont partagées avec des tiers à des fins d'analyse ou de recherche. Le système proposé assure non seulement la sécurité des données en transit, au repos et en cours d'utilisation, mais garantit également la confidentialité et l'intégrité informatique pour les calculs statistiques simples. Ceci est réalisé en tirant parti des attributs de la technologie blockchain, qui assure la disponibilité et l'intégrité des données, combinés au cryptage homomorphe, qui assure la confidentialité des données utilisées. Les calculs sont effectués sur des contrats intelligents résidant sur la blockchain, garantissant ainsi l'intégrité informatique. Le système proposé est implémenté sur la blockchain Zama et effectue des opérations statistiques, notamment la moyenne, la médiane et la variance sur les données cryptées. Les résultats indiquent qu'il est possible d'effectuer des calculs entièrement homomorphes sur la blockchain. Même si les limitations informatiques actuelles de la blockchain ne permettent pas d'exécuter le système pour de grands ensembles de données, la technologie est disponible et, avec les progrès vers des opérations homomorphes plus efficaces sur les blockchains, le système proposé fournira une solution ultime pour fournir la sécurité tant souhaitée. propriétés dans les applications, y compris la confidentialité des données et des statistiques, la confidentialité et l'intégrité au repos, en transit et en cours d'utilisation.

Mots-clés : confidentialité des données ; intégrité des données; intégrité informatique ; cryptage homomorphe ; chaîne de blocs ; confidentialité statistique; sécurité des données; secret statistique

check for updates

Citation : Raj, R. ; Kurt Peker, Y. ; Mutlu, ZD Blockchain et Cryptage homomorphe pour la sécurité des données et la confidentialité statistique. Électronique 2024, 13, 3050. https://doi.org/10.3390/electronics13153050

Rédacteur académique : Simeone Marino

Reçu : 8 juin 2024
Révisé : 20 juillet 2024
Accepté : 26 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

La protection de la vie privée des utilisateurs et de la confidentialité des données sensibles est vitale dans tous les systèmes où les données des utilisateurs sont stockées, transmises ou traitées. Souvent, les données doivent être analysées à des fins commerciales ou pour le bénéfice du public. Par exemple, les données de recensement enregistrent des informations sur la population d'un pays, d'un État, d'une ville ou d'autres zones géographiques bien définies . Ils incluent des informations sensibles telles que l'âge, la race, le sexe, les croyances religieuses et, dans de nombreux cas, l'état de santé à long terme. Les données du recensement sont les principales données utilisées pour comprendre les conditions sociales, économiques et démographiques aux niveaux local et national et fournissent les informations dont les gouvernements ont besoin pour élaborer des politiques, planifier et gérer les services publics et allouer des financements. La protection des données du recensement est essentielle, de la collecte au traitement. Une mesure de protection consiste à autoriser uniquement les personnes autorisées à accéder aux données. Le chiffrement est un mécanisme courant pour mettre en œuvre cette protection. Les données sont cryptées lors du stockage et transmises entre les utilisateurs autorisés. Cependant, il existe un risque d'erreurs involontaires de la part d'utilisateurs autorisés ou d'un utilisateur autorisé devenant malveillant, mettant en péril la sécurité et la confidentialité des données ainsi que l'intégrité de l'analyse. Dans certains cas, les données doivent être mises à la disposition de tiers (par exemple, des chercheurs) afin qu'une analyse appropriée et objective puisse être effectuée. Dans ces cas, pour protéger la vie privée des utilisateurs, les données sont anonymisées ou anonymisées avant d'être partagées. Cependant, ces méthodes ne préservent pas toujours la confidentialité des utilisateurs comme prévu. Outre les erreurs involontaires et le ris

Machine Translated by Google

menaces, lorsque de grands ensembles de données sont mis à disposition, les informations des utilisateurs peuvent être divulguées en raison d' attaques plus sophistiquées. surtout lorsque de grands ensembles de données sont mis à disposition. L' étude de 2016 « Exposée ! Une enquête sur les attaques contre les données privées »par Dwork et al. présente une étude des attaques courantes contre les données agrégées. Il décrit les attaques de reconstruction et de traçage. Les attaques de reconstruction impliquent le rapprochement des caractéristiques sensibles des individus au sein d'un ensemble de données. Les attaques de traçage visent à déterminer si les données d'un individu cible sont incluses ou non dans l'ensemble de données [1]. L'étude de Dwork est suivie de nombreuses études axées sur les attaques contre la confidentialité des données et les mécanismes pour s'en défendre [2–6].

Deux termes liés à la sécurité des données au sens statistique sont la confidentialité statistique et la confidentialité statistique. La confidentialité statistique est « l'art de concevoir un mécanisme de confidentialité qui transforme les données sensibles en données à la fois utiles et non sensibles » [7]. L'objectif des méthodologies statistiques de confidentialité est de « permettre un large partage de données dans différents contextes et domaines de données où il est souhaité ou requis que l'identité ou les attributs sensibles des individus soient protégés (par exemple, recensement, santé, données génomiques, réseaux sociaux) » [8].

Le secret statistique fait référence à la « protection des informations des unités statistiques individuelles » ou, de manière équivalente, à « la protection des données collectées à des fins statistiques » [9]. La confidentialité statistique est étroitement liée à la confidentialité statistique. Même s'il n'existe pas de distinction claire entre ces termes dans la littérature, sur la base des définitions référencées dans cet article, nous considérons que le secret statistique désigne la protection des unités statistiques, c'est-à-dire les données collectées sur les individus ou les entreprises, et la garantie de l'utilisation approuvée des données. eux. La confidentialité statistique est le concept de sécurité plus large qui inclut la transformation de données sensibles en données non sensibles et utiles. Le secret statistique est l'un des principes fondamentaux des statistiques officielles approuvés par l'Assemblée générale des Nations Unies [10]. Il s'agit également d'un principe fondamental des statistiques européennes, définissant des principes, des règles et des procédures pour protéger les données confidentielles tout en permettant leur utilisation à des fins statistiques [11].

La première publication de Innovations in Federal Statistics [12] aborde les défis et la nécessité d'un nouveau paradigme dans le système statistique fédéral. Le chapitre 5 de la publication intitulé « Protéger la vie privée et la confidentialité tout en fournissant un accès aux données à des fins de recherche » se concentre sur la protection de la confidentialité des informations collectées à des fins statistiques. Après avoir discuté des implications en matière de sécurité de la liaison de plusieurs ensembles de données à des fins d'analyse, y compris le fondement juridique de la vie privée et de la confidentialité, les auteurs tirent deux conclusions majeures : « À mesure que les agences statistiques fédérales progressent dans la liaison de plusieurs ensembles de données, elles doivent simultanément s'attaquer à la quantification et au contrôle des données. risque de perte de confidentialité » et « Les techniques de renforcement de la confidentialité et l'analyse des données statistiques préservant la confidentialité peuvent potentiellement permettre l'utilisation de sources de données du secteur privé pour les statistiques fédérales ».
Avec ces conclusions, ils recommandent que « les agences statistiques fédérales devraient adopter des technologies modernes de bases de données, de cryptographie, de préservation et d'amélioration de la vie privée ».

Dans cette étude, nous proposons un système qui assure la sécurité des données, la confidentialité statistique et la confidentialité en utilisant des techniques et des outils purement mathématiques et informatiques . Nous explorons l'utilisation d'un système basé sur la blockchain qui permet d'effectuer des calculs statistiques sur des données cryptées en utilisant un cryptage entièrement homomorphique sur la blockchain à l'aide de contrats intelligents. Le système proposé assure la sécurité des données de bout en bout depuis le moment où elles quittent le propriétaire des données jusqu'au moment où le chercheur reçoit les résultats des calculs statistiques. La sécurité assurée inclut l'intégrité et la confidentialité des données en transit, au repos et en cours d'utilisation. Non seulement les points de données individuels ne sont jamais révélés en texte clair, mais les résultats ne sont disponibles que pour les utilisateurs autorisés sous forme de texte brut. De plus, étant donné que les calculs sont effectués sur la blockchain, il est presque impossible de falsifier les algorithmes de calcul statistique. De plus, demander des statistiques autres que celles approuvées sur le contrat intelligent n'est pas possible. En tant que tel, le système proposé assure la confidentialité statistique souhaitée dans diverses applications, y compris les systèmes statistiques fédéraux. Dans la section 2, nous fournissons de brèves descriptions d'études récentes dans lesquelles la blockchain et le cryptage homomorphe sont utilisés pour assurer la sécurité des données. Dans

Machine Translated by Google

Section 3, nous décrivons notre système proposé et la mise en œuvre d'une preuve de concept pour le système. Dans la section 4, nous présentons les résultats de l'exécution de la preuve de concept et enfin, dans la section 5, nous proposons une discussion des résultats.

2. Travaux connexes

De nombreuses études ont tenté d'introduire la sécurité et l'intégrité des données non seulement lorsqu'elles sont au repos, mais également lorsqu'elles sont utilisées par divers moyens, notamment le cryptage homomorphe et la technologie blockchain. Une de ces études propose un système pour un paradigme collaboratif de formation de données pour le partage de données d'images médicales dans lequel le registre blockchain assure la décentralisation des modèles d'apprentissage fédérés sans s'appuyer sur un serveur central, et le cryptage homomorphe atténue les problèmes liés au partage de données brutes [13]. Leur système crypte les gradients de manière homomorphe et les partage via la blockchain.

Liang et coll. [14] proposent l'intégration de la blockchain et du cryptage homomorphe pour relever les défis de la protection des droits d'auteur sur les circuits. Leur étude propose un modèle mathématique basé sur le cryptage homomorphe au sein de la blockchain qui sécurise les transactions tout en garantissant l'intégrité et la confidentialité des données grâce à l'utilisation de contrats intelligents.

Yaji et coll. [15] ont proposé un système qui utilise les schémas de cryptage Goldwasser-Micali et Paillier pour l'étude d'évaluation comparative en mettant l'accent sur les techniques de confidentialité des données utilisant la technologie blockchain pour les applications d'IA. L'étude a révélé que les attaques sur la blockchain telles que les collisions, les pré-images et les attaques sur le portefeuille peuvent être évitées grâce au cryptage des blocs à l'aide des schémas de cryptage proposés par Goldwasser-Micali et Paillier.

Mutlu et coll. [16] ont proposé un système qui utilise la technologie blockchain et le cryptage homomorphe et permet à des tiers (chercheurs) d'effectuer une régression linéaire sur des données cryptées. Ils utilisent l'algorithme Pallier pour calculer la somme requise pour la régression linéaire via des contrats intelligents. Le propriétaire des données crypte les données à l'aide de la clé publique du chercheur et les envoie au contrat intelligent où le calcul est effectué. Le résultat crypté est ensuite accessible au chercheur, qui peut le déchiffrer sur son système à l'aide de sa clé privée.

Vanin et coll. [17] proposent un modèle pour sécuriser le dossier de santé personnel (PHR) qui utilise un système de fichiers de protocole interplanétaire basé sur des tables de hachage distribuées (DHT) ainsi que sur la blockchain. Les métadonnées PHR sont stockées sur la blockchain et partagées sur le réseau, tandis que les données PHR sont stockées hors chaîne via le réseau IPFS. Ils utilisent deux éléments : Data Steward (DS), qui est responsable du stockage des PHR au nom de l'individu, et Shared Data Vault (SDV), qui est une zone de stockage IPFS temporaire où les établissements de santé peuvent accéder aux PHR avec le consentement de l'individu. . Les données cryptées sont accessibles au public via des portails statistiques, où ils peuvent effectuer des opérations sur les données en utilisant le cryptage homomorphe pour obtenir des résultats significatifs. Pour cela, ils utilisent la Microsoft Simple Encrypted Arithmetic Library (SEAL), qui implémente l'algorithme BFV en JavaScript.

Oumar et coll. [18] ont proposé un modèle de vote électronique utilisant l'algorithme Paillier. Une fois que l'électeur a voté, celui-ci est crypté de manière homomorphe. Un nouveau bloc de transaction est alors créé, qui contient les bulletins de vote cryptés, l'adresse pseudonyme de l'électeur et de l'administrateur, l'horodatage de la création du bloc, le hachage du bloc précédent de la transaction, ainsi que le hachage du bloc actuel. Ensuite, le nouveau bloc de transaction est extrait à l'aide du mécanisme de consensus. Après l'extraction, le nouveau bloc est inscrit dans le grand livre de la blockchain. Ce processus se poursuit jusqu'à la fin de l'élection, après quoi l'administrateur compte les votes cryptés grâce à l'algorithme Paillier, qui donne la somme finale, qui peut ensuite être décryptée pour déterminer les résultats.

Shrestha et coll. [19] ont mené une étude qui analyse les problèmes de sécurité liés à l' Internet des objets (IoT). L'une des préoccupations majeures soulignées est la confidentialité des données. Cette étude explore également la possibilité d'intégrer l'IoT à la blockchain et au chiffrement homomorphe. Les avantages incluent l'immuabilité des données, le caractère inoubliable, la suppression des points de défaillance uniques et la confidentialité des données.

Machine Translated by Google

Caldarola et coll. [20] ont proposé le Neural Fairness Protocol, un mécanisme de consensus qui intègre l'algorithme de signature numérique à courbe elliptique (ECDSA) et des techniques cryptographiques. Ce protocole améliore l'anonymat et la responsabilité dans les transactions blockchain, notamment grâce au développement d'un algorithme ECDSA à seuil robuste. Au-delà de son application initiale, cette innovation montre un potentiel pour améliorer la sécurité de diverses crypto-monnaies, telles que Litecoin et Mastercoin.

Le système proposé dans cette étude peut être comparé aux travaux proposés par Liang [14], Yaji [15] et Mutlu [16] dans le sens où il utilise la technologie blockchain ainsi que le cryptage homomorphe pour assurer la confidentialité des données pendant qu'elles sont stockées. sont utilisés. De plus, le système proposé par Mutlu [14] utilise un cryptage homomorphe partiel sur le contrat intelligent, ce qui est similaire à l'architecture du système proposé. Cependant, les études mentionnées ci-dessus utilisent l'algorithme de Pallier, qui est partiellement homomorphe, alors que cette étude utilise un système entièrement homomorphe qui permet non seulement l'addition mais également la multiplication sur les données cryptées, permettant ainsi d'effectuer un plus large éventail de calculs en toute sécurité.

3. Matériels et méthodes

Dans cette section, nous décrivons un système qui permet le partage et l'analyse sécurisés de données entre les propriétaires de données et des tiers. Les propriétaires de données sont des entités ou des individus qui ont accès aux données brutes. Ils pourraient également être considérés comme des capteurs capables de traiter des données et de les transmettre. Les propriétaires sont autorisés ou consentent à ce que les données soient analysées à condition que la confidentialité des données soit préservée. Les tiers du système sont des chercheurs. Il peut s'agir de personnes physiques ou d'une entité autorisée à effectuer certains types d'analyses sur les données. Ils peuvent ne pas avoir l'autorisation de visualiser les données en clair.

3.1. Description du système proposé

Le système crypte les données à l'aide d'un schéma de cryptage homomorphe avant qu'elles ne quittent le propriétaire des données. Les données cryptées sont stockées sur un contrat intelligent sur la blockchain. Les analyses pouvant être effectuées sur les données sont également stockées sur le contrat intelligent. Lorsqu'un chercheur doit effectuer une analyse des données, en supposant que le type d'analyse est disponible sur le contrat intelligent, l'analyse est effectuée sur les données cryptées à l'aide de calculs homomorphes. Les résultats des calculs homomorphes sont également cryptés. Pour recevoir le résultat de son côté, le chercheur demande que le résultat soit rechiffré avec la clé du chercheur afin qu'il puisse être transmis en toute sécurité au chercheur et décrypté uniquement par le chercheur. Il convient de noter ici que les données en clair ne sont jamais révélées pendant tout le processus, même lors du rechiffrement. Lorsque le chercheur envoie sa clé publique au contrat intelligent pour rechiffrement, le contrat intelligent lance un protocole de décryptage distribué par lequel des parties du résultat sont déchiffrées par différents validateurs, rechiffrées à l'aide de la clé publique du chercheur, puis combinées pour obtenir le résultat final rechiffré [21]. La figure 1 montre un aperçu du système avec un propriétaire de données et un chercheur comme principaux acteurs.

Machine Translated by Google

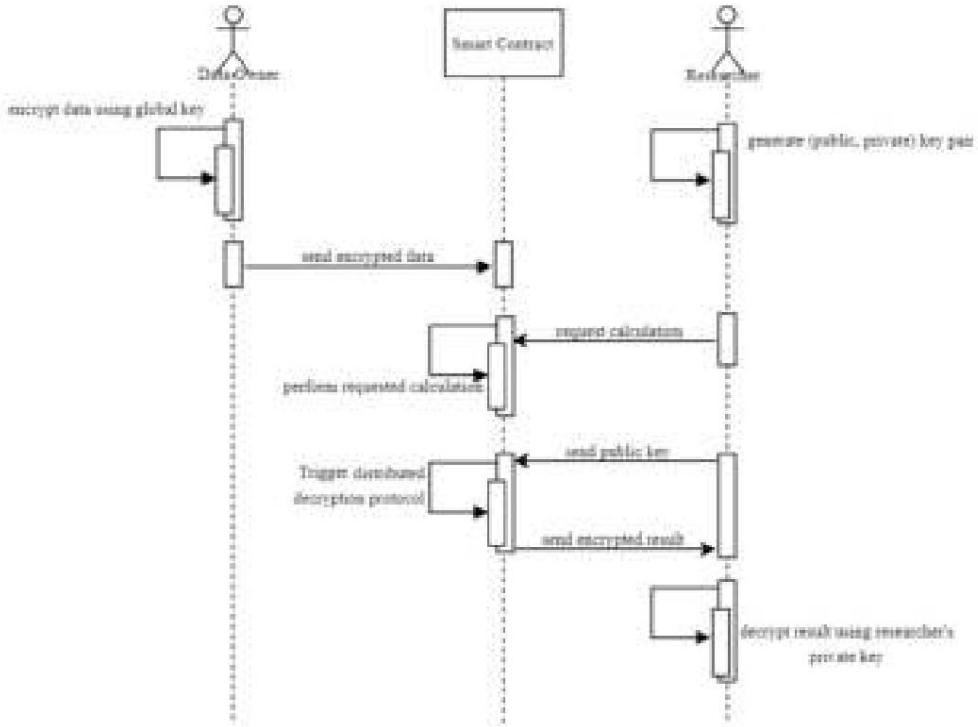


Figure 1. Un aperçu du système proposé.

3.2. Implémentation

Le système proposé est implémenté sur la Zama Blockchain, une blockchain basée sur la machine virtuelle Ethereum (EVM) qui prend en charge le calcul sur des valeurs cryptées [18]. Comme Ethereum, qui possède une monnaie appelée Ether, Zama possède sa propre monnaie, appelée ZAMA. L'idée de base de Zama est de fournir des contrats intelligents confidentiels. Cela signifie que les données envoyées ou reçues du contrat intelligent sont cryptées et ne peuvent pas être lues si le transfert de données est intercepté. Zama utilise un cryptage asymétrique et utilise donc deux clés : publique et privée. La clé publique, également connue sous le nom de clé globale, est stockée publiquement sur la chaîne et est utilisée par chaque utilisateur pour chiffrer ses données et effectuer des calculs sur ces données chiffrées. La clé globale est générée lors d'une phase de configuration par les validateurs initiaux et repartagée en toute sécurité lorsque l'ensemble des validateurs est modifié [21]. Cela permet de mélanger les données cryptées de plusieurs utilisateurs et sur plusieurs contrats intelligents. La clé privée est utilisée pour déchiffrer les données et n'appartient à aucun utilisateur. Au lieu de cela, Zama utilise un protocole de seuil. Dans un protocole à seuil, des éléments de la clé privée sont distribués entre les nœuds validateurs du réseau, et un certain nombre de validateurs doivent coopérer pour décrypter les données. Dans le cas de Zama, la participation d'au moins un tiers des validateurs est nécessaire pour effectuer le décryptage [18]. Cette méthode améliore la sécurité grâce à la décentralisation, empêchant toute utilisation malveillante de la clé. Zama utilise un schéma de chiffrement probabiliste, ce qui signifie que la valeur chiffrée d'un seul texte en clair ne sera pas toujours la même. Par exemple, considérons un tableau comportant 4 éléments [2, 4, 1, 4]. Une fois les éléments de ce tableau chiffrés, hypothétiquement, il deviendrait [d5048, e2314, x3215, o9849]. Notez que le chiffre 4 apparaît deux fois dans le tableau de texte en clair à l'index 1 et à l'index 3, mais sa version cryptée n'a aucune répétition et les valeurs à l'index 1 et à l'index 3 sont différentes. Ce schéma améliore encore la sécurité en empêchant les attaquants de déduire des informations sur le texte clair tt sur la base de modèles présents dans le texte chiffré.

ff

tt

Le système proposé utilise les bibliothèques de calculs homomorphes fournies par Zama. Une fois le contrat compilé, il produit l'Application Binary Interface (ABI).
L'ABI spécifie les fonctions disponibles dans le contrat intelligent ainsi que leurs paramètres et types de retour, permettant aux utilisateurs d'interagir avec le contrat intelligent. Le propriétaire des données et le chercheur disposent tous deux de leurs propres applications JavaScript qui utilisent l'ABI et les méthodes.

Machine Translated by Google

fourni par la bibliothèque Ethers pour communiquer avec le contrat intelligent. Le propriétaire des données envoie les données au contrat intelligent et le chercheur demande une analyse au contrat intelligent. La figure 2 représente l'interaction des acteurs avec le contrat intelligent.

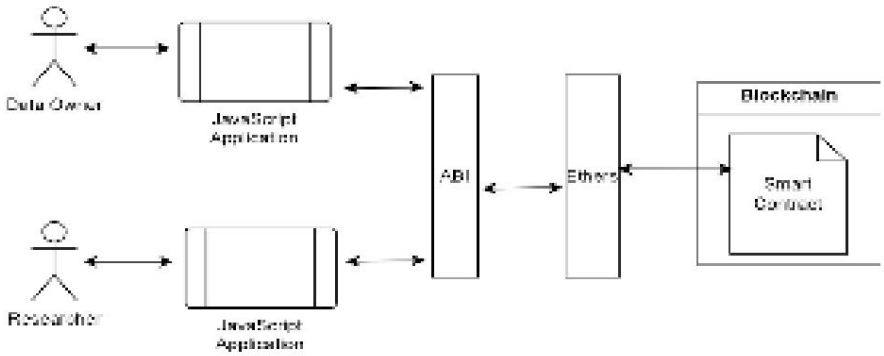


Figure 2. Interaction avec le contrat intelligent.

Voici une liste d'outils et de technologies utilisés pour mettre en œuvre le système :

- Solidity : un langage de programmation utilisé pour rédiger des contrats intelligents sur divers plateformes, dont Ethereum.
- Node.js : Il s'agit d'un environnement d'exécution JavaScript qui permet l'exécution de code JavaScript en dehors du navigateur Web. La version 18.18.0 a été utilisée pour ce système.
- Remix : il s'agit d'un environnement de développement intégré (IDE) basé sur un navigateur utilisé pour développement et déploiement de contrats intelligents.
- MetaMask : il s'agit d'un portefeuille de crypto-monnaie utilisé pour se connecter et interagir avec la blockchain.
- Visual Studio Code : il s'agit d'un IDE qui prend en charge le développement de diverses programmations. langages, y compris JavaScript.
- Ethers.js : C'est une bibliothèque JavaScript qui permet d'interagir avec des contrats intelligents. La version 6.10.0 a été utilisée pour ce système.
- FhEVM : C'est une bibliothèque fournie par Zama qui permet la création de contrats intelligents confidentiels sur EVM en utilisant Solidity. La version 0.4.0 a été utilisée pour ce système.
- FhEVMjs : Il s'agit d'une bibliothèque JavaScript fournie par Zama qui permet d'interagir avec des contrats intelligents, notamment le chiffrement des données et la génération de clés publiques/privées. La version 0.4.0 a été utilisée pour ce système.

Une preuve de concept du système proposé est mise en œuvre dans le cadre de cette étude. En raison des limitations des bibliothèques pour les calculs homomorphes sur Zama et du travail sur une blockchain publique, comme cela sera expliqué dans la section 3.2.1, la mise en œuvre comprenait des calculs de statistiques descriptives simples telles que la moyenne, la médiane et la variance. La preuve de concept a été testée avec un petit nombre de points de données, avec une plage de nombres comprise entre 1 et 50.

3.2.1. Défis Lors de

la mise en œuvre du système, les limitations et défis suivants ont été identifiés dans Solidity et Zama :

- Types de données : fhEVM ne prend en charge que les entiers non signés de 8 bits, 16 bits, 32 bits ou 64 bits. De plus, les méthodes fournies par fhEVM pour les calculs sur des données cryptées telles que l'addition, la soustraction, la multiplication et la division renvoient un entier non signé crypté. Dans le cas de la division, il existe une limitation supplémentaire : un entier chiffré ne peut être divisé qu'avec un entier en texte brut. Cela signifie qu'il n'est actuellement pas possible de diviser deux entiers chiffrés. Même si une telle division était possible, le résultat serait toujours un entier chiffré en raison de son type de retour ; il n'est donc pas possible de travailler avec des nombres décimaux. De plus, les entiers

Machine Translated by Google

ne sont pas signés ; par conséquent, il n'est pas non plus possible de gérer des entiers négatifs. Ces limitations limitent le nombre d'analyses pouvant être effectuées sur le contrat intelligent. • Limite de gaz : les calculs sur la blockchain fonctionnent au gaz, une unité de coût associée à l'exécution d'une transaction ou d'un calcul sur le réseau. Le gaz est utilisé pour payer les validateurs pour les ressources qu'ils utilisent pour effectuer des transactions. La limite de gaz fait référence à la quantité maximale de gaz pouvant être dépensée pour une transaction ou un calcul. Fixer une limite de consommation de gaz est important car cela garantit que les transactions ont une limite supérieure prédéfinie de consommation de ressources afin de se prémunir contre les scénarios dans lesquels l'exécution de code pourrait entrer dans une boucle infinie. Actuellement, il existe une limite de gaz de 10 000 000 sur Zama Devnet [22]. Cependant, les calculs homomorphes sont assez coûteux en ressources, et comme ces calculs sont effectués sur le contrat intelligent, ils consomment beaucoup de gaz. La consommation de gaz dépend des opérations effectuées sur les données cryptées et augmente avec la complexité de l'algorithme et des bits du type de données (les opérations 32 bits consommeraient plus de gaz que les opérations 8 bits). La limite de gaz actuelle limite la fonctionnalité en termes de nombre de points de données pouvant être traités.

- Solidity : contrairement aux langages de programmation traditionnels tels que Python et Java, Solidity présente diverses limitations. L'un d'eux est que la structure de données utilisée pour stocker les valeurs des paires de clés (mappages) est assez limitée en termes de fonctionnalités et qu'il n'est pas possible de parcourir les clés ou les valeurs. Cela rend difficile la mise en œuvre de divers algorithmes, tels que le calcul du mode (la valeur la plus fréquente dans un tableau).

3.2.2. Calcul de la moyenne

Pour un ensemble de valeurs {x1, x2, . . . , xn}, la moyenne arithmétique, notée $\overline{x}$, est la somme des valeurs divisée par le nombre de valeurs, comme le montre l'équation (1).

$$\overline{X} = \frac{\sum_{je=1}^{n} xi}{n} \quad (1)$$

Dans le système conçu, seul le numérateur, la somme des valeurs chiffrées, est calculé sur le contrat intelligent. L'opération de division est effectuée du côté du chercheur . Cela est dû à la limitation mentionnée dans la section 3.2.1 selon laquelle une division renverra toujours un entier et perdra donc la précision du résultat. Pour résumer, le smart contract envoie la somme chiffrée ainsi que le nombre d'éléments chiffrés au chercheur.

Ces deux valeurs sont ensuite décryptées par le chercheur, et une division finale est effectuée pour obtenir le résultat.

3.2.3. Calcul de la médiane

Calculer la médiane des données triées est une tâche simple. En supposant que les données soient constituées de n valeurs, la médiane est l'élément du milieu si n est impair et est la moyenne des deux éléments du milieu si n est pair. La formule pour la médiane d'un ensemble de données triées avec n points de données est donnée dans l'équation (2).

$$\text{Moyen} = \begin{cases} \frac{n+1}{2}^{ème} \text{ element ifn est impair} \\ \text{2) thelement+(n 2 +1)} \\ \text{thelement (n ifn est pair} \\ 2 \end{cases} \quad (2)$$

Dans le système, la différenciation dans le calcul de la médiane est simplement gérée à l'aide d'une instruction if. Si n est impair, la médiane est calculée sur le contrat intelligent et renvoyée au chercheur sous forme cryptée. Si n est pair, la somme des deux éléments du milieu est calculée sur le contrat intelligent et envoyée au chercheur. Le résultat est ensuite décrypté par le chercheur et divisé par 2 pour obtenir la médiane.

Ainsi, le chercheur prend la décision d'effectuer la division en fonction du nombre d'éléments.

Le calcul médian ci-dessus suppose que les données sont triées. Cependant, le plus grand défi dans le calcul de la médiane des données non triées est la mise en œuvre d'un algorithme de tri sur le contrat intelligent, car trier les données cryptées n'est pas une tâche triviale. Le

Machine Translated by Google

Le système proposé utilise l'algorithme de tri à bulles pour trier les données. Cet algorithme a été choisi en raison de sa simplicité. Il fonctionne en comparant deux valeurs adjacentes dans un tableau et en échangeant les nombres en fonction du résultat de cette comparaison, ce qui facilite sa mise en œuvre. De plus, la mise en œuvre du tri à bulles ne nécessite aucune structure de données supplémentaire. Cela le rend approprié pour écrire dans Solidity, compte tenu des limitations du langage de programmation ainsi que de la bibliothèque fhEVM.

3.2.4. Calcul de l'écart

La formule pour calculer la variance pour un ensemble de valeurs {x1, x2, . . . , xn} est donné dans l'équation (3), où x représente la moyenne des données.

$$V = \frac{\sum_{je=}^{n} (xi - \bar{x})^2}{1\,n - 1} \quad (3)$$

Comme indiqué dans la section 3.2.2, il n'est pas possible de calculer la moyenne exacte d'une séquence sur le contrat intelligent car la fonction de division de la bibliothèque fhEVM renvoie toujours un entier crypté. Pour éliminer le calcul de la moyenne dans la formule de variance, nous avons dérivé une formule équivalente qui n'incluait pas la moyenne ni aucun opérateur de division autre qu'une opération de division majeure à la dernière étape. La dérivation étape par étape de la formule commençant par l'équation (3) est présentée ci-dessous.

$$V = \frac{\sum_{je=}^{n} (xi - \bar{x})^2}{1\,n - 1}$$

$$= \frac{\sum_{je=1}^{n} (xi -) \; n - 1_{n}^{\sum_{j=1}^{n} xj}}{}^{2}$$

$$= \frac{\sum_{je=1}^{n} (xi^{2} \; \frac{\sum_{(\cdot)}^{n} \sum_{j=1}^{n} xj \; j=1 \; xj + \frac{n}{n}}{n} - 2xi)}{n - 1}^{2}$$

$$= \frac{2n}{2n} \frac{\sum_{je=1}^{n} (xi^{2} - 2xi + \frac{\sum_{j=1}^{n} xj}{n} \quad \frac{(\sum_{j=1}^{n} xj)}{2n})}{n - 1}^{2}$$

$$= \frac{\sum_{je=1}^{n} (n\,2xi^{2} - 2n\,2xi \frac{\sum_{j=1}^{n} xj\,2 + n}{n} \quad \frac{(\sum_{j=1}^{n} xj)}{2n})}{n2\,(n - 1)}^{2}$$

$$= \frac{n\,2\sum n\,2\,je=1\,xi \quad - 2n\sum_{i=1}^{n} (xi\sum_{j=1}^{n} xj) + \sum_{je=1}^{n} (\sum_{j=1}^{n} xj)}{n\,2(n - 1)}^{2}$$

$$= \frac{n\,2\sum n\,je=1\,xi^{2} \; n - 2n\sum_{j=1}^{n} (xi\sum_{j=1}^{n} xj\,m2 + (n\,xj)) + n(\sum}{}^{2} \quad (4)$$

Cette approche a supprimé le calcul de la moyenne de l'algorithme et, par conséquent, a également supprimé la division. Cependant, comme le montre l'équation (4), il n'a pas été possible d' éliminer complètement la division. Compte tenu de ces limitations, seul le calcul du numérateur est implémenté sur le contrat intelligent. Le résultat crypté du numérateur est envoyé au chercheur avec la valeur cryptée de n, où la division finale est effectuée. En examinant de plus près l'équation (4), on peut observer qu'il y a trois composantes principales dans le numérateur lui-même. De plus, le numérateur implique également une soustraction. Comme indiqué dans la section 3.2.1, Zama ne fournit que des entiers non signés, ce qui signifie que tout résultat inférieur à zéro nuirait à l'exactitude du résultat. Pour atténuer le problème, ces trois composants sont calculés séparément et leurs résultats sont stockés dans des variables distinctes. Ensuite, le premier composant est ajouté au troisième, et le deuxième composant est ensuite soustrait du résultat de l'addition. Cela garantit que le résultat ne tombe pas en dessous de zéro.

Machine Translated by Google

3.3. Assurances de sécurité du système proposé

Le système proposé répond aux exigences de sécurité pour tous les principes de la sécurité de l'information. Il fournit des garanties de sécurité lorsque les données sont en transit, au repos et en cours d'utilisation. Ensuite, nous décrivons comment la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité sont assurées dans le système proposé.

- Confidentialité : Les données sont chiffrées avant d'être partagées et restent ensuite chiffrées . Les données sont cryptées en transit, au repos et en cours d'utilisation, garantissant ainsi la confidentialité statistique. Les données cryptées sont transmises au contrat intelligent, où elles sont stockées, permettant ainsi d'effectuer des calculs sur elles. Le résultat de ces calculs est également crypté. Avant que le résultat ne soit partagé avec le chercheur, il est rechiffré après avoir été déchiffré en interne sur la blockchain à l'aide du protocole de décryptage distribué. Cette opération n'est pas visible sur les blocs de la chaîne et n'est donc pas visible par les utilisateurs. Tromper le système pour obtenir la clé de déchiffrement nécessiterait la collaboration d'un tiers des nœuds de la blockchain, ce qui est un scénario peu probable pour les blockchains. • Intégrité des données : Chaque bloc d'une blockchain contient le hachage du bloc précédent, créant ainsi une chaîne. La falsification d'un bloc modifie le hachage de ce bloc et de tous les blocs qui le suivent. Étant donné qu'établir la chaîne avec les blocs mis à jour est une tâche presque impossible, les données de la blockchain sont inviolables. Cela garantit l'intégrité des données. • Intégrité des calculs : Les algorithmes de calculs autorisés sur les données sont implémentés sur le contrat intelligent. Étant donné que les contrats intelligents font partie de la blockchain, il n'est pas possible de les modifier de manière non autorisée. Cela garantit l'intégrité des calculs et donc la confiance dans les algorithmes mis en œuvre pour les calculs. • Autorisation : L'autorisation dans le système proposé peut être considérée sous deux angles. L'un est le contrôle du type d'analyse qui peut être effectué sur les données. Étant donné que les fonctions d'analyse sont disponibles sur le contrat intelligent dans le système proposé et que seuls les utilisateurs/entités autorisés peuvent modifier la fonctionnalité du contrat intelligent, un chercheur est limité à l'utilisation des fonctions disponibles sur le contrat intelligent. En supposant que seules les fonctions approuvées soient implémentées sur le contrat intelligent, un chercheur ne peut pas effectuer une analyse non approuvée des données. L'autre considération d'autorisation dans le système concerne qui peut envoyer des données au contrat intelligent et qui peut demander une analyse des données. Les applications blockchain peuvent être programmées pour contrôler l'accès aux fonctions fournies dans le contrat intelligent. Chaque utilisateur est identifié de manière unique par sa clé publique, et cette clé peut être utilisée pour déterminer son accès aux fonctions du contrat intelligent.

- Disponibilité : la disponibilité est une fonctionnalité fournie par la blockchain elle-même en raison de sa nature décentralisée. Chaque nœud du réseau possède sa propre copie du grand livre, donc même si un nœud devient indisponible, l'ensemble du système reste accessible. Cela supprime un point de défaillance unique et introduit une tolérance aux pannes dans le système.

4. Résultats

Nous avons effectué la mise en œuvre de la preuve de concept du système, où le contrat intelligent a la fonctionnalité nécessaire pour calculer la moyenne, la médiane et la variance de l'ensemble de données. Nous avons enregistré le temps nécessaire pour effectuer diverses opérations pour les points de données 4, 8, 10, 16, 24 et 32. Ces opérations incluent la configuration des données (c'est-à-dire l'envoi des données au contrat intelligent), le calcul de la moyenne, le tri des données. (ce qui est nécessaire pour trouver la médiane), le calcul de la médiane et le calcul de la variance. Toutes les expériences ont été réalisées avec un type de données de 16 bits. Chaque ensemble de données a été généré aléatoirement avec des points compris entre 0 et 50. Chaque ensemble de données produit a été envoyé immédiatement au contrat intelligent. Chaque taille d'ensemble de données a été testée huit fois pour garantir la fiabilité des résultats. Les tests ont été effectués à différents moments et dans différents lieux géographiques avec une connectivité différente. Le tableau 1 montre la durée moyenne de huit essais pour chaque taille d'ensemble de données.

Machine Translated by Google

Tableau 1. Durée des opérations entre la demande et le résultat, en millisecondes.

Nombre de Points de données (n)	Envoi en cours Données	Signifier Calcul	Tri des données	Médian Calcul	Variance Calcul
4	8088.66679	7512.111693	9063.634214	6312.926094	18 109.45269
8	6642.155596	8792.629253	22 330.79229	7679.880587	28 161.12535
dix	7243.960528	10 486.1769	34 412.11508	7358.729393	
16	7111.459872	11 948.44701			
24	9990.13181	16 596,62563			
32	13 358,13821	21 479,25259			

Comme le montre le tableau 1, la taille de certains ensembles de données n'était pas adaptée à certains opérations en raison de la limite de gaz imposée par Zama. Par exemple, alors que le processus de tri a été effectué sur des ensembles de données contenant 4, 8 et 10 points de données, le processus de variance a été appliqué uniquement aux ensembles de données contenant 4 et 8 points de données. Envoi des ensembles de données au la blockchain et le calcul de la valeur moyenne pourraient être effectués sur tous les ensembles de données.

La figure 3 compare les délais de chaque opération en fonction du nombre de points de données. Il compare également les horaires des différentes opérations. Dans l'ensemble, comme le nombre de points de données augmente, le temps nécessaire à une opération augmente également. Quelques exceptions à cela sont l'envoi de données pour un plus petit nombre de points de données et le calcul médian. Nous attribuons cela s'explique par le fait que les opérations qui nécessitent un court laps de temps sont plus susceptibles être impacté par le volume des transactions ainsi que par la qualité du réseau connectivité. Comme le montre le graphique, la variance et le tri prennent plus de temps que la définition. données, calcul de la moyenne et calcul de la médiane. Le calcul de la médiane prend le moins de temps puisqu'il s'agit de quelques opérations simples par rapport aux autres opérations indépendamment de la taille des données.

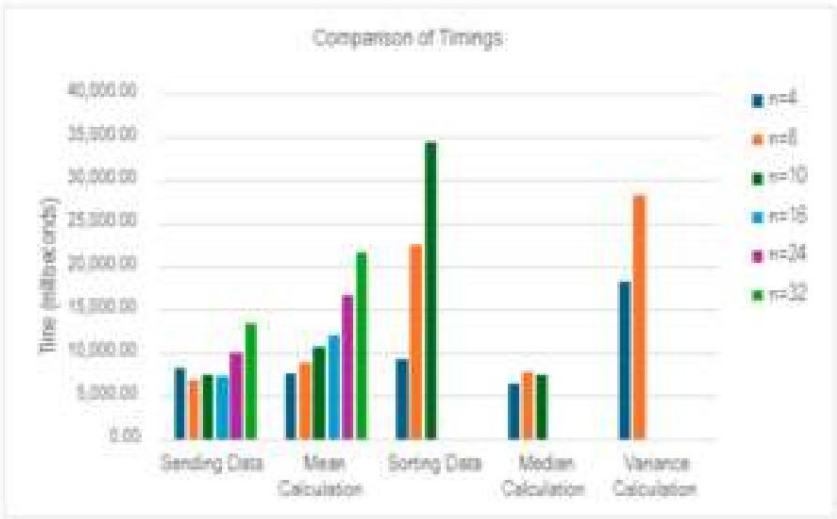


Figure 3. Comparaison des horaires des opérations par rapport au nombre de points de données.

Nous avons également enregistré la consommation de gaz de chaque opération pour chaque test et vérifié que le Le tri des données et le calcul de la variance ont atteint la limite de gaz imposée par Zama à 10 points de données et 8 points de données, respectivement. Le tableau 2 montre les moyennes des huit essais pour chaque donnée définir la taille.

Machine Translated by Google

Tableau 2. Consommation de gaz des opérations.

Nombre de Points de données (n)	Envoi en cours Données	Signifier Calcul	Tri Données	Médian Calcul	Variance Calcul
4	290 491,5	577 618	1 367 854	169 517	5 022 035
8	565 458,875	1 124 706	6 007 343	169 517	8 213 723
dix	709 171,5	1 398 250	9 565 005	169 517	
16	1 166 246,625	2 218 883			
24	1 835 907,625	3 313 060			
32	2 574 607,375	4 407 237			

Il n'est pas étonnant que la consommation de gaz soit cohérente pour le nombre de points de données donné. pour la même opération. La figure 4 montre une comparaison de la consommation de gaz par rapport au nombre de points de données pour chaque opération ainsi qu'une comparaison de la consommation de gaz par rapport à les différentes opérations.

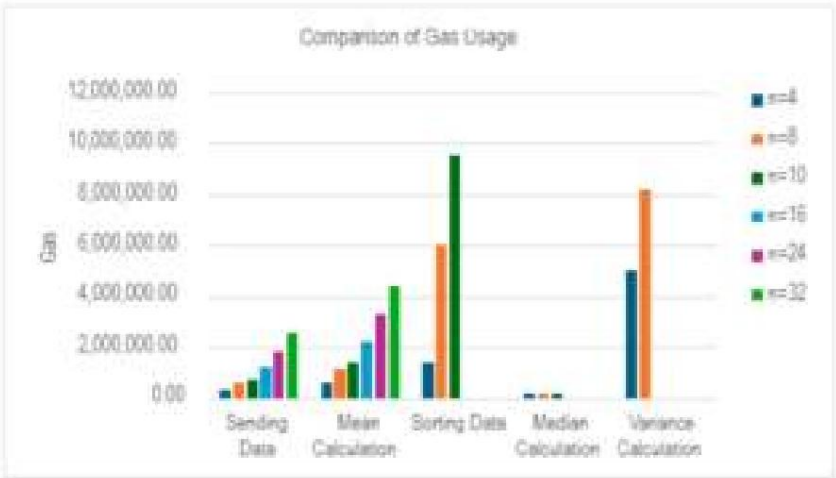


Figure 4. Comparaison de la consommation de gaz des opérations par rapport au nombre de points de données.

Comme le montre la figure 4 , la consommation de gaz augmente avec le nombre de points de données, à l'exception du médian. Le calcul de la médiane impliquait une simple opération consistant à trouver l'indice du élément central, ne nécessitant qu'un seul ajout et une seule division quel que soit le nombre de points de données. Par conséquent, la consommation de gaz était la même pour les trois tailles d'ensembles de données. Calculer le La médiane nécessite que les données soient triées. Cependant, comme le tri des données nécessite trop de gaz, il ne peut pas être calculé pour plus de 10 points de données. De même, le calcul de l'écart est requis environ 10 millions de gaz pour huit points de données. L'ajout d'un point de données supplémentaire nécessiterait plus de 10 millions de gaz, ce qui dépasserait la limite de gaz imposée par Zama. Comme si évident à partir du graphique et de la description de la mise en œuvre des opérations dans Section 3, les opérations qui nécessitent plus de calculs nécessitent plus de gaz.

5. Discussion

Cette étude a proposé un système qui assure la sécurité des données, la confidentialité statistique et confidentialité en utilisant des techniques et des outils purement mathématiques et informatiques. Le système utilise un cryptage entièrement homomorphique sur une blockchain et garantit la sécurité de bout en bout des données depuis le moment où elles quittent le propriétaire des données jusqu'au chercheur. reçoit les résultats du calcul. Les données sont sécurisées en transit, au repos, ainsi que dans utiliser. De plus, le système proposé fournit également une intégrité informatique. Avec tout les protections qu'il offre, le système est une solution ultime pour répondre à la sécurité des données exigences.

Machine Translated by Google

Une implémentation de preuve de concept pour le système proposé est réalisée sur la blockchain publique Zama. Lors de la mise en œuvre, un chercheur peut demander des calculs sécurisés de moyenne, de médiane et de variance. Les résultats de synchronisation pour effectuer les opérations requises sur différents nombres de points de données sont présentés, ainsi que les limites du travail avec des bibliothèques de chiffrement homomorphes et une blockchain publique. Bien que cette étude démontre avec succès la possibilité de sécuriser les données et les calculs sur une blockchain en utilisant un cryptage entièrement homomorphique, certains défis et domaines doivent être améliorés.

Les opérations entièrement homomorphes sont assez coûteuses en termes de ressources, et il existe des limites quant au nombre de calculs pouvant être effectués sur la blockchain avant de dépasser les limites de gaz et de coût. Ceci est particulièrement critique lors de l'exécution de l'application sur le réseau principal, où les transactions entraînent des frais. Cette limitation peut être partiellement atténuée sur un réseau blockchain privé ou autorisé. Une telle blockchain offre des garanties similaires à celles de la blockchain publique et donne plus de contrôle sur qui peut utiliser l'application.

Les futures études dans ce domaine pourront intégrer des algorithmes plus complexes dans diverses disciplines, allant des statistiques à l'apprentissage automatique, et inclure une gamme de données plus large à mesure que davantage de ressources seront disponibles et que la technologie progressera. De plus, les algorithmes traditionnels conçus pour les données en texte brut, tels que la recherche et le tri, doivent être soigneusement révisés pour prendre en charge les calculs homomorphes, sous réserve des capacités des bibliothèques disponibles. Une autre direction possible pour les études futures pourrait être de développer un cadre prenant en charge les calculs entièrement homomorphiques sur ce contrat intelligent et offrant une plus large gamme de fonctionnalités tout en surmontant les limites du système actuel, comme permettre la division de deux nombres cryptés et incorporer des nombres décimaux ou flottants. numéros de points.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, YKP ; Conservation des données, RR, YKP et ZDM ; Analyse formelle, YKP et ZDM ; Enquête, RR, YKP et ZDM ; Méthodologie, RR et YKP ; Administration de projet, YKP ; Ressources, RR, YKP et ZDM ; Logiciels, RR et ZDM ; Supervision , YKP; Validation, RR, YKP et ZDM ; Visualisation, YKP et ZDM ; Rédaction – ébauche originale, RR et YKP ; Rédaction – révision et édition, RR, YKP et ZDM Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans cette étude sont incluses dans l' article. Toute demande complémentaire peut être adressée au(x) auteur(s) correspondant(s).

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Dwork, C. ; Forgeron, A. ; Steinke, T. ; Ullman, J. Exposé ! Une enquête sur les attaques contre les données privées. Ann. Rév. Stat. Appl. 2017, 4, 61-84. [Référence croisée]
2. Kitamura, K. ; Irvan, M. ; Yamaguchi, RS Anonymity teste les attaques et les indicateurs de vulnérabilité pour la divulgation des « caractéristiques des patients » dans les articles médicaux. Dans les actes des ateliers du Symposium européen de l'IEEE 2022 sur la sécurité et la confidentialité (EuroS&PW), Gênes, Italie, du 6 au 10 juin 2022 ; pp. 186-193. [Référence croisée]
3. Nissim, K. Confidentialité : de la reconstruction de bases de données aux théorèmes juridiques. Dans les actes du 40e symposium ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI sur les principes des systèmes de bases de données, dans PODS'21, événement virtuel, Chine, 20-25 juin 2021 ; Association pour les machines informatiques : New York, NY, États-Unis, 2021 ; p. 33-41. [Référence croisée]
4. Wang, Y.-R. ; Tsai, Y.-C. La protection du partage de données pour la confidentialité dans Financial Vision. Appl. Sci. 2022, 12, 7408. [CrossRef]
5. Agarwal, S. Sray et Mishra Données et confidentialité des modèles. Dans IA responsable : mise en œuvre d'algorithmes éthiques et impartiaux ; Springer Édition internationale : Cham, Suisse, 2021 ; pp. 153-170. [Référence croisée]
6. Sokolovska, A. ; Kocarev, L. Intégration des concepts techniques et juridiques de confidentialité. Accès IEEE 2018, 6, 26543-26557. [Référence croisée] 7. Kifer, D. ; Lin, B.-R. Une vision axiomatique de la confidentialité et de l'utilité statistiques. J. Priv. Confidentialité 2012, 4. [CrossRef]
8. Slavkovic, A. ; Seeman, J. Confidentialité des données statistiques : une chanson de confidentialité et d'utilité. Ann. Rév. Stat. Appl. 2023, 10, 189-218. [Référence croisée]
9. C.3. Confidentialité statistique—Guide des compilateurs MSITS 2010—Wiki des statistiques de l'ONU. Disponible en ligne : https://unstats.un.org/ wiki/display/M2CG/C.3.++Statistiques+confidentialité (consulté le 4 juin 2024).

Machine Translated by Google

10. DSNU – Principes fondamentaux des statistiques officielles nationales. Disponible en ligne : https://unstats.un.org/fpos/ (consulté sur 5 juin 2024).
11. Confidentialité statistique et protection des données personnelles – Eurostat. Disponible en ligne : https://ec.europa.eu/eurostat/web/ microdonnées/confidentialité-statistique-et-protection-des-données-personnelles (consulté le 18 juin 2024).
12. Académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine ; Division des sciences comportementales et sociales et de l'éducation ; Comité des statistiques nationales ; Panel sur l'amélioration des statistiques fédérales pour la recherche en politiques et en sciences sociales à l'aide de sources de données multiples et de méthodes d'estimation de pointe ; Bosquets, RM ; Harris-Kojetin, BA (Eds.) Innovations dans les statistiques fédérales : combiner les sources de données tout en protégeant la confidentialité ; The National Academies Press : Washington, DC, États-Unis, 2017. [CrossRef]
13. Kumar, R. ; Kumar, J. ; Khan, AA; Ali, H. ; Bernard, CM; Khan, Russie ; Zeng, S. Agrégation de modèles de préservation de la confidentialité basée sur la blockchain et le cryptage homomorphe pour les images médicales. Calculer. Méd. Graphique d'imagerie. 2022, 102, 102139. [Réf. croisée] [Pub Med]
14. Liang, W. ; Zhang, D. ; Lei, X. ; Tang, M. ; Li, K.-C. ; Zomaya, A. Circuit Copyright Blockchain : homomorphique basé sur la blockchain Cryptage pour la protection des circuits IP. IEEETrans. Émerger. Haut. Calculer. 2020, 9, 1410-1420. [Référence croisée]
15. Yaji, S. ; Bangera, K. ; Neelima, B. Préservation de la confidentialité dans la blockchain basée sur un système de cryptage homomorphe partiel pour les applications d'IA. Dans les actes de la 25e Conférence internationale de l'IEEE 2018 sur les ateliers sur le calcul haute performance (HiPCW), Bengaluru, Inde, 17-20 décembre 2018 ; pp. 81-85. [Référence croisée]
16. Mutlu, ZD; Peker, Yukon ; Aydın, A. Régression linéaire basée sur la blockchain Selçuk préservant la confidentialité. J. Millimeterwave Com-mun. Optimale. Modèle. 2023, 3, 45-49. Disponible en ligne : https://www.jomcom.org/index.php/1/article/view/81 (consulté le 5 juin 2024).
17. Vanin, FN; Policarpo, LM; Righi, RD; Zut, SM ; da Silva, VF; Goldim, J. ; da Costa, CA Un modèle de protection des données de bout en bout basé sur la blockchain pour le partage de dossiers de santé personnels : une approche de cryptage entièrement homomorphique. Capteurs 2023, 23, 14. [Référence croisée] [Pub Med]
18. Oumar, B. ; Olaniyi, O. ; Olajide, D. ; Dogo, E. Paillier ChainNode basé sur un cryptosystème pour un vote électronique sécurisé. Devant. Blockchain 2022, 5, 927013. [CrossRef]
19. Shrestha, R. ; Kim, S. Intégration de l'IoT avec la blockchain et le cryptage homomorphique : problèmes et opportunités difficiles. Av. Calculer. 2019, 115, 293-331. [Référence croisée]
20. Caldarola, F. ; d'Atri, G. ; Zanardo, E. Protocole de blockchain d'équité neuronale utilisant une loterie à courbes elliptiques. Mathématiques 2022, 10, 3040. [Référence croisée]
21. fhevm/fhevm-whitepaper.pdf sur main·zama-ai/fhevm·GitHub. Disponible en ligne : https://github.com/zama-ai/fhevm/blob/main/fhevm-whitepaper.pdf (consulté le 4 juin 2024).
22. Estimation du gaz|0,3|fhEVM. Disponible en ligne : https://docs.zama.ai/fhevm/v/0.3-2/how-to/gas (consulté le 4 juin 2024).

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Analyse de modélisation de l'assemblage de canaux dans les CRN basée sur Stratégie de planification prioritaire avec file d'attente réservée

Qian Yu Xu [1], Suoping Li 2,*, Jaafar Gaber 3 et Yuzhou Han [2]

1 École de génie électrique et électronique, Université aéronautique de Xi'an, Xi'an 710077, Chine ; 202202001@xaau.edu.cn

2 École d'ingénierie électrique et de l'information, Université de technologie de Lanzhou, Lanzhou 730050, Chine ; 19119376252@163.com

3 Département d'Informatique et de Génie Informatique, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France ; gaber@utbm.fr

* Correspondance : lsuop@lut.edu.cn

Résumé : Dans les réseaux radio cognitifs, l'assemblage de canaux permet aux utilisateurs secondaires (SU) d'étendre la capacité du réseau et d'améliorer l'utilisation du spectre. Les stratégies de planification basées uniquement sur une classification hétérogène des services ne peuvent pas garantir la priorité de fourniture de services élastiques vitaux dans des scénarios particuliers tels que les secours d'urgence. Par conséquent, une stratégie d'ordonnancement prioritaire avec file d'attente réservée (Ps-rq) est proposée dans ce travail. Un facteur statique est défini pour classer les SU en services élastiques et services en temps réel en fonction du type de message, tandis qu'un facteur dynamique est défini pour différencier les services élastiques hautement prioritaires en fonction de la validité des informations, de la corrélation des messages et de la taille des messages. Les utilisateurs hautement prioritaires dans les services élastiques interrompus sont placés dans la file d'attente réservée pour assurer ses services. En conséquence, l'algorithme de planification et le processus d'accès dynamique au canal s
Une analyse de chaîne de Markov en temps continu est effectuée et tous les états de transition, événements déclencheurs, taux de transition et conditions de transition possibles du système à partir d'un état général sont dérivés. De plus, des indices d'évaluation des performances du système sont obtenus. Les cas d'études et les résultats de simulation prouvent que la stratégie proposée peut améliorer la capacité du réseau, réduire la probabilité de blocage et la probabilité de terminaison forcée pour les utilisateurs secondaires, et améliorer considérablement les performances des services élastiques hautement prioritaires. De plus, nous analysons les caractéristiques du Ps-rq à travers une comparaison complète avec quatre autres schémas. L'expérience prouve que la stratégie Ps-rq peut améliorer efficacement la qualité de service des services élastiques vitaux sur la base d' une planification équitable.

Mots-clés : réseaux radio cognitifs ; assemblage de canaux ; stratégie de planification des priorités ; file d'attente réservée ; chaîne de Markov ; utilisation du spectre; conditions de transition

check for updates

Citation : Xu, Q. ; Li, S. ; Gaber, J. ; Han, Y. Analyse de modélisation de l'assemblage de canaux dans les CRN basée sur une stratégie de planification prioritaire avec File d'attente réservée. Électronique 2024, 13, 3051. https://doi.org/10.3390/électronique13153051

Rédacteurs académiques : Duc Tai Le et Syed Muhammad Raza

Reçu : 11 juin 2024
Révisé : 29 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les réseaux de communication sans fil traditionnels reposent principalement sur une allocation statique du spectre. Cependant, l'utilisateur licencié occupe toujours une bande de fréquence fixe, ce qui entraînera un gaspillage excessif de spectre [1]. Les réseaux radio cognitifs (CRN) permettent aux utilisateurs secondaires (SU) d'explorer et d'utiliser le spectre inutilisé des utilisateurs primaires (PU) grâce à la détection du spectre pour améliorer l'utilisation du spectre [2,3].

L'amélioration de l'utilisation du spectre nécessite que les systèmes radio cognitifs planifient et allouent de manière flexible les ressources spectrales disponibles [4,5]. L'accès dynamique au spectre (DSA) peut garantir que les SU ont accès aux lacunes du spectre dans la bande passante du spectre sous licence [6]. La flexibilité du DSA se reflète dans le fait que les SU en cours peuvent quitter le canal une fois qu'ils ont détecté les signaux des PU, puis l'adaptation du spectre peut être effectuée via un transfert de spectre ou une sélection dynamique de canal. La conception de règles de planification des ressources basées sur DSA qui sont conformes à l'environnement d'application peut aider à améliorer les performances du réseau secondaire [7].

Machine Translated by Google

Dans les CRN, l'adoption de la technologie d'assemblage de canaux et de la technologie d'adaptation du spectre dans le processus de DSA peut améliorer considérablement l'efficacité du service des SU. La technologie d'assemblage de canaux permet aux SU de lier ou de regrouper un canal inactif à plusieurs pour augmenter la capacité du réseau secondaire. Combinées à la technologie d'adaptation du spectre, les SU en cours peuvent ajuster de manière adaptative le nombre de canaux assemblés en fonction des activités des autres PU et SU pour fournir une planification flexible. Cependant, la modélisation du processus DSA basé sur l'allocation des ressources est complexe, il est donc nécessaire d'analyser et d'évaluer les performances des réseaux secondaires pour aider à concevoir des règles de fonctionnement.

La performance de service des SU est indissociable de la méthode de planification et d'allocation des ressources. Le flux de services dans les communications sans fil peut être divisé en services en temps réel (tels que l'audio et la vidéo) et en services élastiques (tels que les données) en fonction de la sensibilité au retard. Le service en temps réel a généralement une priorité plus élevée que le service élastique, tandis que le service élastique a une sensibilité au retard plus faible et son débit de transmission peut être ajusté de manière adaptative en fonction de l'environnement réseau.

Les chercheurs ont proposé diverses méthodes d'allocation de ressources pour le trafic hétérogène afin d'améliorer l'utilisation du spectre [8-14]. La technique principale consiste à regrouper les ressources spectrales disponibles dans un pool de fréquences en fonction de l' environnement dynamique du réseau, puis à les allouer à la demande. Parmi eux, les réf. [10–13] ont étudié le problème de planification des ressources des réseaux radio cognitifs multicanaux avec un trafic hétérogène basé sur l'assemblage de canaux et ont utilisé des méthodes mathématiques pour établir le modèle d'analyse permettant d'évaluer les performances des réseaux secondaires. Des recherches antérieures [11] ont prouvé que la disposition d'un nombre variable de canaux assemblés pour les services élastiques et d'un nombre fixe de canaux assemblés pour les services en temps réel en fonction de l' environnement d'exploitation peut contribuer à améliorer l'efficacité du spectre.

Dans [15], les auteurs ont proposé que l'adoption du processus de chaîne de Markov en temps continu (CTMC) puisse fournir une méthode de modélisation pour l'analyse des performances des CRN avec assemblage de canaux, ce qui présente l'avantage d'éviter le problème de synchronisation temporelle des PU et SU sur le même canal. Dans [11], les auteurs ont proposé une stratégie d'assemblage de canaux prenant en compte l'adaptation du spectre et les services hétérogènes, et CTMC a été utilisé pour évaluer les performances du réseau secondaire. Cependant, la SU interrompue par le PU ne peut pas continuer le service après avoir quitté le canal, ce qui augmente évidemment la possibilité que la SU soit abandonnée. Par conséquent, la réf. [12] ont proposé d'établir des files d'attente pour des services hétérogènes et d'adopter un algorithme de planification de files d'attente pour améliorer la capacité du réseau sur la base de la priorisation. Des recherches antérieures [12,16] ont prouvé que l'établissement de files d'attente pour les SU peut améliorer la capacité du réseau et réduire la probabilité de blocage des SU.
En considérant une variété de facteurs qui affectent la capacité du canal, y compris une liaison sans fil variable dans le temps, un tampon fini, des classes de trafic et un schéma de modulation et de codage adaptatif (AMC), une stratégie d'assemblage de canaux avec des files d'attente a été proposée dans [17] et le L'interaction entre les paramètres du système a été étudiée en établissant un modèle d'analyse CTMC.
Basé sur l'assemblage de canaux, un algorithme de location de spectre adaptatif a été proposé dans [18], et les performances DSA du trafic SU avec priorité d'accès ont été discutées en développant le modèle CTMC. Les recherches ci-dessus montrent que l'adoption de la technologie d'assemblage de canaux pour des services hétérogènes peut améliorer l'utilisation du spectre inactif. En outre, la création du CTMC peut aider à modéliser la dynamique de planification des ressources spectrales parmi les utilisateurs dans le cadre du problème d'allocation des ressources. La recherche susmentionnée présente une méthodologie plus rigoureuse et raffinée pour analyser mathématiquement les performances du système secondaire.

Dans les CRN dotés de services multi-types, l'allocation de ressources basée sur la classification des services peut améliorer la fiabilité de la transmission d'informations importantes. Cependant, les améliorations aboutissent généralement à un problème de pénurie de services peu prioritaires en raison d'un manque de service pendant une longue période. Des schémas de planification des ressources qui peuvent atténuer le problème de famine des utilisateurs faiblement prioritaires ont été proposés dans [19-21], et les performances du système secondaire ont été évaluées en établissant des modèles d'analyse de Markov avec des files d'attente. Dans [20], la technologie de liaison de canal avec atténuation de la famine a été adoptée, et une priorité non pré

Machine Translated by Google

Le modèle de file d'attente M/G/1 a été utilisé pour décrire le processus de transfert de spectre des SU, afin d'améliorer l'utilisation des ressources. Un algorithme de planification à priorité ronde (RRP) combinant l'allocation de ressources statique et dynamique a été proposé dans [21]. Cet algorithme a obtenu les opportunités de transmission des utilisateurs faiblement prioritaires en suspendant temporairement la file d'attente hautement prioritaire. Le but est de minimiser le manque de services peu prioritaires dans les CRN. En fait, l'algorithme RRP de [21] adopte la planification des interrogations de file d'attente, mais lorsque le trafic d'une file d'attente est important, la planification des utilisateurs uniquement basée sur l'interrogation de la file d'attente réduira considérablement les performances du système [22]. La planification de services hétérogènes, basée sur la division des types de services, peut en effet offrir un schéma de planification prioritaire plus pratique pour l'allocation de canaux et la planification prioritaire dans les CRN lors de l'initialisation du système . Cependant, les recherches précédentes n'ont pas réussi à répondre aux exigences de transmission des utilisateurs élastiques hautement prioritaires dans les applications pratiques, échouant ainsi à fournir une solution fondamentale au problème de la famine de service causée par les priorités de planification.

Par conséquent, cela motive l'investigation de notre étude. Cet article étudie la planification et l'allocation des ressources avec la classification des services pour les CRN qui nécessitent un classement des services dans des scénarios spéciaux. Certains services élastiques importants doivent bénéficier d' une priorité plus élevée dans les scénarios d'application spéciaux des CRN, notamment les secours d'urgence, les drones [23] et les drones. Par conséquent, étant donné que les schémas de planification avec des services hiérarchiques conduisent souvent à un problème de manque de services de faible priorité en raison de longues périodes de services non desservis, l'objectif de cette étude est d'améliorer l'efficacité de la fourniture d'informations importantes en fournissant un mécanisme de distribution aussi équitable. que possible.

Différent de nos études précédentes [9], cet article considère un schéma de planification plus général basé sur des services hétérogènes. Le but de cette étude est de proposer un schéma de planification et d'allocation de ressources plus complet pour les CRN, capable de garantir la qualité de service des services élastiques hautement prioritaires. Plus spécifiquement, sur la base de la planification d'interrogation, une nouvelle file d'attente réservée est fournie pour les services élastiques à haute priorité qui sont interrompus par des PU, et la priorité la plus élevée est accordée aux SU dans la file d'attente réservée.
Sur la base de la technologie d'assemblage de canaux et d'adaptation du spectre, le processus dynamique d'accès au spectre de services hétérogènes est analysé et l'allocation des ressources de spectre entre les SU est étudiée à travers le développement d'un CTMC. Les principales contributions de cette étude sont les suivantes : 1. Cette étude

propose une stratégie d'ordonnancement prioritaire avec file d'attente réservée (stratégie Ps-rq). Le modèle de système et le schéma de classification des services de la stratégie proposée sont présentés. En combinant la technologie d'assemblage de canaux et d'adaptation du spectre, un schéma d'attribution de priorité proportionnelle basé sur la stratégie Ps-rq est obtenu.

2. Le processus de flux de ressources du réseau secondaire est cartographié sur un CTMC. En employant des méthodes d'analyse stochastique, les activités complexes des utilisateurs dans le CRN sont associées individuellement aux transitions d'état. L'événement de transition, le taux de transition et la condition de transition qui peuvent déclencher des changements dans les états du système sont fournis, offrant ainsi une base théorique pour améliorer les performances de systèmes secondaires grâce à l'assemblage de canaux.

3. La procédure de réduction dimensionnelle des chaînes de Markov de grande dimension est donnée. Sur cette base, les résultats analytiques de la performance du réseau secondaire sont étudiés et simulés numériquement. Nous présentons une comparaison du Ps-rq avec quatre schémas précédents, et il est prouvé par vérification numérique que la stratégie proposée garantit la qualité de service pour les services élastiques importants interrompus tout en maintenant une planification équitable.

2. Stratégie de planification prioritaire avec file d'attente réservée (stratégie Ps-rq)

Cette section fournit un schéma de classification des services hétérogènes pour les CRN avec des services multi-types. Sur cette base, une stratégie d'ordonnancement prioritaire avec file d'attente réservée (Ps-rq) est proposée. L'objectif est de fournir une planification équitable aux CRN dotés de services multi-types, ce qui peut garantir la fiabilité de la livraison des informations importantes tout en atténuant le problème de famine des files d'attente à faible priorité.

Machine Translated by Google

2.1. Modèle du système et hypothèses

Les réseaux radio cognitifs centralisés (CRN) se composent de deux types de radios, les utilisateurs primaires (PU) et les utilisateurs secondaires (SU). La planification des utilisateurs est contrôlée par la station de base correspondante. Le nœud central est responsable de l'interaction avec l'environnement environnant , ainsi que de la gestion de l'allocation du spectre et des décisions de planification vers d'autres SU via un canal de contrôle. Le nœud central des CRN centralisés peut améliorer les performances du système en prenant des décisions efficaces et en réduisant les interférences entre les utilisateurs. Contrairement aux CRN distribués, les CRN centralisés éliminent le besoin de délibérations supplémentaires sur des aspects tels que les interférences entre utilisateurs et l'égoïsme des nœuds.

Nous supposons qu'il existe M (M Z) PU partageant la bande passante spectrale et que chaque PU ne peut accéder qu'à un seul canal. Par rapport aux SU, les PU ont une priorité absolue d'accès aux canaux. Les SU sont équipés de moyens de détection de l'énergie spectrale, en supposant que les SU aient une capacité de détection parfaite. Et le temps de détection requis est si court que les PU n'atteindront pas le canal dans ce délai. Une fois le PU détecté, le SU en cours libérera immédiatement les canaux assemblés et quittera et effectuera en même temps une adaptation du spectre. En supposant que moins de temps soit consacré à l'adaptation du spectre, la commutation de canal n'affectera pas la transmission des SU.

2.2. Classification des services hétérogènes

Pris en charge par le modèle système, cette section propose un schéma de classification de services hétérogène pour satisfaire les demandes de planification des CRN avec des services multi-types comprenant des données, des images, de l'audio et de la vidéo. Par exemple, un retard de livraison ou une perte de paquets d' informations vitales sur des patients lors d'une urgence médicale peut mettre la vie en danger, et cette partie de l'information est principalement un service élastique. Cependant, une étude précédente [12] basée sur la classification des services hétérogènes n'a pas pris en compte les services élastiques importants avec une priorité de livraison élevée dans des scénarios spéciaux. La priorité de transmission et la fiabilité des services élastiques importants peuvent difficilement être garanties. Sur la base d' une classification hétérogène des services, les services multi-types dans les CRN sont également classés par facteurs dynamiques et les services élastiques hautement prioritaires sont séparés. Les détails sont les suivants:

- Facteur statique : type de message. Les SU dans les CRN sont classés en services élastiques (SUe) et services en temps réel (SUr) en fonction de la sensibilité au retard. Les services élastiques présentent les caractéristiques d'une longueur de trame courte, d'un flux de trafic important et d'une tolérance de retard élevée. Les services en temps réel nécessitent la rapidité de la transmission des données. Selon la tolérance de retard, la priorité du service est définie comme suit :

$$\text{Priorité : SUr} > \text{SUe ;}$$

• Facteur dynamique : les services élastiques dans les CRN sont reclassés en fonction de trois facteurs dynamiques, notamment la validité des informations, la corrélation des messages et la taille des messages.

La validité des informations (Val) fait référence au temps restant avant la date limite. Les messages avec des délais restants plus courts ont une priorité plus élevée.

$$\text{Val} = \frac{\text{Le temps restant avant la date limite}}{\text{Le délai de livraison des informations}}; \quad (1)$$

La corrélation de messages (Cor) fait référence au type de message qui doit être transmis en premier.

$$\begin{matrix}\text{Cor} = 1, & \text{Pertinence des informations importantes} \\ \text{Cor} = 0, & \text{Autres}\end{matrix} ; \quad (2)$$

La taille du message (Size) est inversement proportionnelle à la priorité du message.

$$\text{Taille} = \frac{\text{La taille du message du SU}}{\text{Longueur moyenne des messages}}; \quad (3)$$

Machine Translated by Google

Après avoir combiné les trois facteurs dynamiques ci-dessus, les services élastiques sont classés en priorités élevées, moyennes et faibles. L'objectif est d'identifier les services élastiques ayant une priorité élevée (SUh e), puis de les prioriser par rapport aux services temps réel. La priorité du service est suggérée comme suit :

Priorité : DIh e > SUr > SUe

De plus, une vue tridimensionnelle (3D) des priorités des services élastiques est présentée dans la figure 1. Le contrôle flou Takagi – Sugeno est utilisé pour prioriser les services élastiques [24]. La valeur d'entrée du système d'inférence floue va de 0 à 1. La sortie du système est prioritaire et est divisée en trois ensembles flous, dont les domaines sont [−1, 1]. Selon la condition physique, la règle « Si-alors » est adoptée pour définir 27 règles floues, et la priorité des services élastiques est divisée en priorités élevées, moyennes et faibles. Par exemple, si Val = 0, Cor = 1 et Size = 1, alors Priority = 1, ce qui représente des informations importantes avec un temps restant court et une petite taille de message. A partir des variables d'entrée et de sortie, des fonctions d'appartenance gaussiennes et trapézoïdales sont utilisées pour obtenir la vue prioritaire 3D des services élastiques.

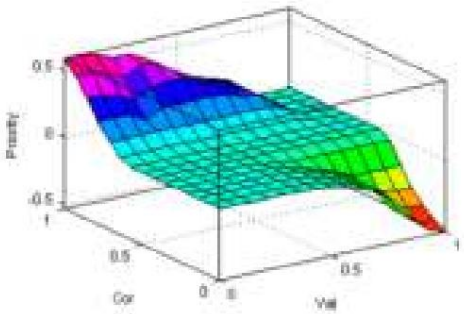


Figure 1. Vue prioritaire 3D des services élastiques.

2.3. Stratégie Ps-rq

Sur la base du schéma de classification des services hétérogènes ci-dessus, le trafic avec des services multi-types entrant dans le système est desservi par la stratégie de planification prioritaire avec file d'attente réservée (stratégie Ps-rq). Comme le montre la figure 2, la stratégie Ps-rq se compose d'une unité de planification d'informations et d'une unité de transmission de données. Les utilisateurs entrant dans le système secondaire (SU) sont divisés en service élastique (SUe) et service en temps réel (SUr) selon un facteur statique via un classificateur de paquets I. (Les classificateurs de paquets sont utilisés dans le but d'analyser les types de paquets entrants.) Différentes files d'attente physiques sont disposées pour SUe et SUr , notées Le et Lr . Si le service des SU est interrompu par un PU pendant la transmission, une adaptation spectrale sera effectuée. Étant donné que SUr nécessite une rapidité élevée et a une tolérance à la gigue, si l'adaptation du spectre échoue, le SUr interrompu sera abandonné et libérera les canaux assemblés, et il ne reviendra pas à la fin de Lr . Autrement dit, Lr n'a pas de boucle de rétroaction.

Contrairement à SUr , SUe a de faibles exigences en matière de rapidité et peut contenir des signaux vitaux . Ainsi, une boucle de rétroaction est organisée pour Le . Le SUe interrompu sera réintégré dans le classificateur de paquets II et classé en priorités élevées, moyennes et faibles sur la base d'un facteur dynamique. Le but est de séparer les services élastiques hautement prioritaires, de les marquer comme SUh e et de les placer dans la file d'attente réservée L e h . Pendant ce temps, le service élastique de priorité moyenne (SUm e) et le service élastique de faible priorité (SUl e) interrompus sont retirés de leurs marques et renvoyés à l'arrière de la file d'attente Le (boucle de rétroaction). En supposant que chaque file d'attente est isomorphe, les utilisateurs secondaires de la file d'attente attendent d'être planifiés selon l' ordre du premier arrivé, premier service (FCFS). La priorité de la file d'attente est définie sur L > Lr > Le . Les SU de types différents ne peuvent s'aligner que dans la file d'attente correspondante. Le service des SU sera bloqué s'il n'y a plus de place dans la file d'attente. S'il est plein lorsque les SUe et SUh interrompus entrent dans la file d'attente correspondante, le service sera forcé de se terminer.

Machine Translated by Google

ff

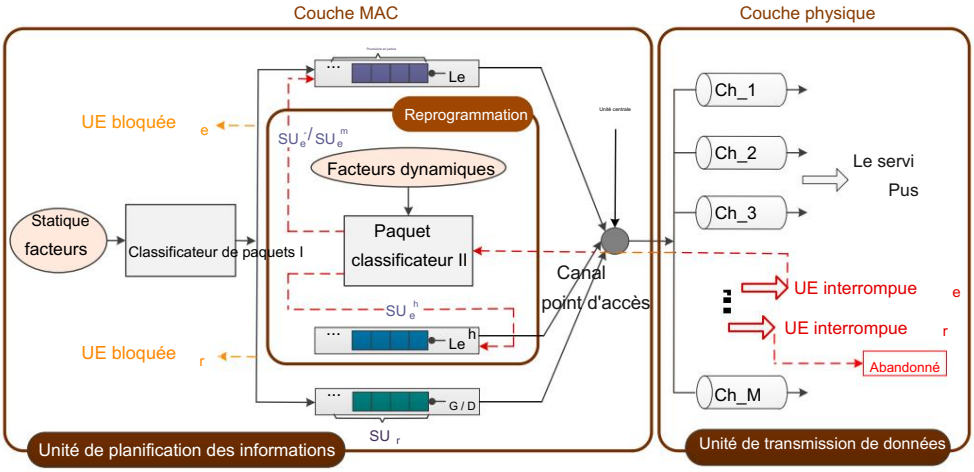


Figure 2. Stratégie Ps-rq.

2.4. Attribution des canaux basée sur la stratégie Ps-rq

Dans le processus de planification, une technologie d'assemblage de canaux est adoptée pour améliorer le taux de service des SU en assemblant un ou plusieurs canaux aux SU. Parallèlement, la technologie d'adaptation du spectre est utilisée pour permettre une allocation adaptative des canaux assemblés. Pour les CRN avec services multi-types, l'allocation de canaux basée sur la stratégie Ps-rq est la suivante : Le SUr et le SUh marqué sont assemblés avec un nombre fixe de canaux pour assurer l'efficacité de la transmission. Plus précisément, le service de SUr peut être démarré. En conséquence, SUh en agrégeant a canaux, où a Z peut démarrer le service en agrégeant b canaux, où b Z . La différence est que SUe peut ajuster de manière flexible assemblés en fonction de la technologie d'adaptation du spectre. Être r Emp ca , le service de SUe peut être démarré en agrégeant w canaux, et le débit de service peut être amélioré en augmentant les canaux agrégés jusqu'à la limite supérieure v, où w, v Z et w ≤ v. Pour faciliter le démarrage du service de SUr et du marqué SUh, le paramétrage de cette étude est basé sur a = b w. Supposons que le taux de service des SU augmente linéairement après l'adoption de la technologie d'assemblage de canaux, le taux de service des SUr avec un assemblage de canaux augmente d' un facteur plusieurs.

e ,

*

,

Les canaux sont attribués aux SU sur la base d'une allocation de canaux proportionnelle avec priorité. Selon la priorité de file d'attente L > Lr > Le h s'il y a N canaux inactifs libres, détectez si les trois files d'attente sont vides. Si aucun d'entre eux n'est vide, le canal inactif est alloué à SUh e , SUr et SUe dans la file d'attente dans la proportion de 1 : α : β, où α, β ≥ 1. Ici, la valeur de α, β peut être déterminée selon aux exigences de priorité et à la tolérance de retard de SUh e , SUr et SUe . Ensuite, les canaux restants sont attribués à SUh e selon leur priorité, suivi de SUr et SUr .

Si seulement deux des files d'attente ne sont pas vides, le processus d'allocation est le même que ci-dessus. Si un seul n'est pas vide, tous les N canaux libres sont alloués à cette file d'attente. De plus, s'il existe encore des canaux inactifs, les canaux restants sont alloués au SUe en cours . Le processus d'allocation ci-dessus est réalisé dans MATLAB et l' allocation proportionnelle des canaux avec priorité est illustrée dans le schéma 1. Ici, le nombre de canaux inactifs est toujours déterminé par les SU obtenant les informations sur les canaux inactifs disponibles via la technologie de détection d'énergie spectrale pour obtenir un accès opportuniste.

Machine Translated by Google

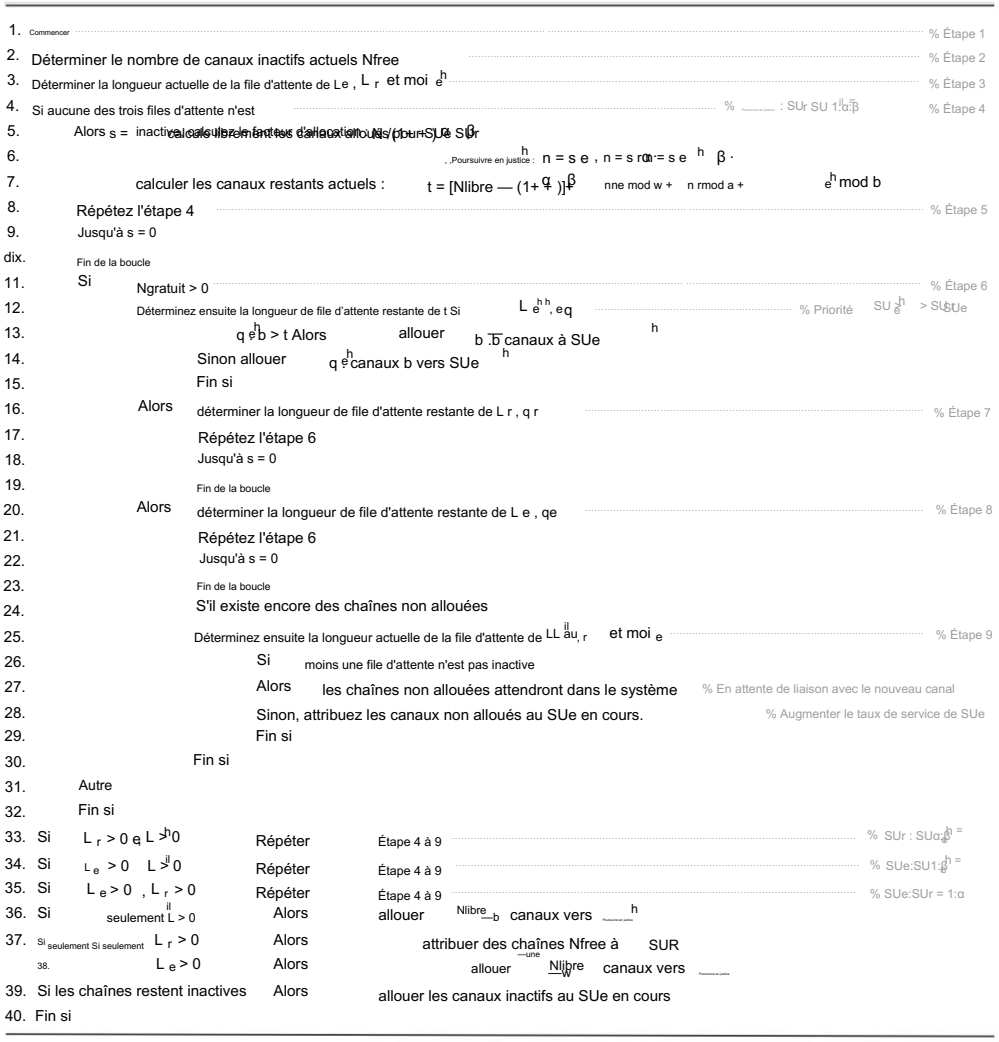


Schéma 1. Attribution proportionnelle des canaux avec priorité.

3. Processus d'accès aux canaux dynamiques

Dans les CRN, les comportements d'arrivée et de départ des PU et SU entraînent un changement dans l'état du système. Afin d'analyser le processus de flux de ressources des SU dans différents états du système, le processus d'accès dynamique au canal basé sur la stratégie Ps-rq proposée est étudié dans cette section en classifiant les activités des utilisateurs dans les CRN en quatre événements : Arrivée PU, départ PU, arrivée SU et départ SU.

• Événement A : arrivée du PU

Les SU dans les CRN sont classés en services élastiques et services en temps réel selon sensibilité du retard. Les services élastiques ont les caractéristiques d'une longueur de cadre courte, lourde fluidité du trafic et tolérance élevée aux retards. Les services en temps réel nécessitent l'actualité des données transmission. Selon la tolérance de retard, la priorité du service est définie comme suit :

Lorsque le PU arrive, s'il y a un canal inactif dans le système, il sera alloué à le PU nouvellement arrivé. Dans ce cas, les services des autres SU ne seront pas affectés. Mais si il n'y a pas de canaux inactifs dans le système, le PU interrompra n'importe quel canal en cours des SU en raison de la priorité d'accès aux données plus élevée. Le SU interrompu quittera le canal et effectuer une adaptation du spectre. Autrement dit, la SUe en cours avec le nombre maximum des chaînes feront don du canal au SU interrompu jusqu'à ce que les canaux assemblés de SUe ne peut pas prendre en charge le service, alors le SUe en cours avec le deuxième nombre maximum des chaînes feront don de leur chaîne . . . jusqu'à ce que l'ensemble des SUe ne puisse pas fournir le nombre de canaux du SU interrompu. Ensuite, l'adaptation échoue, ce qui signifie que tout

Machine Translated by Google

le SUe en cours ne peut pas faire don du canal pour le SU interrompu. Le SU qui échoue au l'adaptation entrera dans le classificateur de paquets II et marquera la priorité via un contrôleur flou. Si le SUe appartient à SUh e , il entrera dans la file d'attente réservée L h e ; sinon, il reviendra à la fin de la file d'attente Le . Si la file d'attente est pleine, le service du SU sera forcé de se terminer.

Si le PU préempte le canal d'un SUr ou d'un SUh marqué e , l'adaptation du spectre sera être effectué de la même manière. Le service continuera lorsque l'adaptation sera réussie ; sinon, le SUr ou SUh interrompu e sera obligé de mettre fin et de libérer l'assemblé canal.

En particulier, les chaînes libérées par le SUh terminé de force ou SUr ne peut pas être le canal inactif peut être utilisé pour les canaux en cours dont les canaux assemblés n'ont pas été utilisés pour démarrer le service des SU dans la file d'attente en raison du réglage de a = b < w. Cependant, le atteindre la limite supérieure avec la technologie d'assemblage de canaux. les canaux libérés par le SUe terminé de force peuvent être utilisés pour la mise en file d'attente SUh e et SUR en L h e . L'allocation de canal des SU dans la file d'attente suit le schéma 1. Si aucune SU dans la Plus précisément, le canal inactif est préférentiellement alloué à obéissant aux et Lr règle du premier arrivé, premier servi (FCFS). Le service de ne peut être démarré que lorsque la file d'attente utilise le canal inactif, ces canaux seront assemblés à d'autres SU, obéissant à la règle 1. des chaînes gratuites existent dans le système. Si ceux qui sont dans la file d'attente n'utilisent pas le canal Règle 1 : Le canal inactif sera préférentiellement assemblé au SUe en cours avec le le canal peut être assemblé pour inactif, minimisez les canaux agrégés jusqu'à ce que le SUe soit assemblé à la limite supérieure, v. S'il y a dans et le service de uniquement si les canaux sont encore inactifs, les canaux restants seront assemblés au SUe en cours avec le deuxième canal agrégé minimum jusqu'à ce que toutes les SUe en cours atteignent le niveau supérieur quand − des canaux gratuits existent dans le système. Si les deux dans la file d'attente ne sont pas liés, v. peuvent être démarrés utilisez le canal inactif, le canal peut être assemblé pour. De même, le service Nous présentons un organigramme, de comme le montre la figure 3, pour montrer l'accès dynamique au canal ne peut être démarré que lorsque − des canaux inactifs existent déjà dans le système. Si pas de traitement basé sur la stratégie Ps-rq à l'arrivée du PU. De même, d'autres événements, tels que PU le départ, l'arrivée du SU et le départ du SU peuvent également utiliser l'organigramme pour décrire le canal Le SU dans la file d'attente utilise le canal inactif, le canal sera assemblé au processus d'accès en cours aux dans le système, en obéissant à la règle 1. SU.

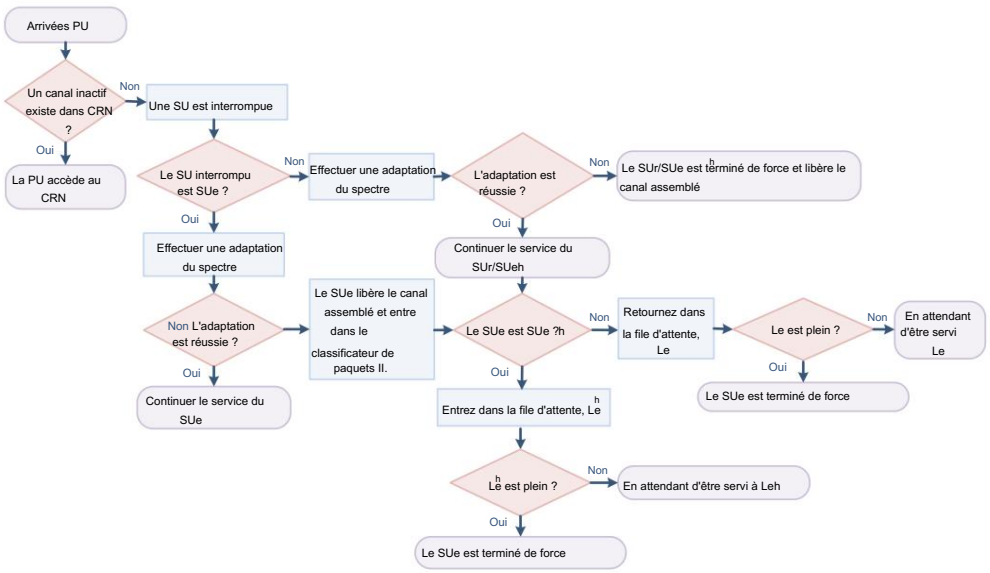


Figure 3. Le processus d'accès dynamique au canal basé sur la stratégie Ps-rq à l'arrivée du PU.

Figure 3. Le processus d'accès dynamique au canal basé sur la stratégie Ps-rq à l'arrivée du PU.

• Événement C : arrivée du SU.

• Événement B : départ du PU

Il existe trois types d'arrivée de SU dans le système : Le départ d'une PU libère un canal. La . Si le SU arrivant au système l'est et qu'il y a b canaux inactifs dans le système, le canal inactif peut utilisé pour les SU en attente dans la file d'attente. Si les SU dans la file d'attente n'utilisent pas le canal inactif, être utilisé pour les SUe en cours dont les canaux assemblés n'ont pas atteint peut être démarré. De même, le service de la limite supérieure avec la technologie d'assemblage de canaux. puis le service des nouveaux arrivants Plus précisément, le canal inactif est préférentiellement alloué à SUh e en L e , obéissant à la règle Les nouveaux arrivants peuvent être démarrés lorsque le nombre de chaînes existantes dans du premier arrivé, premier servi (FCFS). Le service de SUh e ne peut être démarré que lorsque b − 1 est libre le système atteint la valeur minimale w ou a . Si les chaînes gratuites du système ne peuvent pas exister dans le système. Si le SUh e dans la file d'attente, n'utilisez pas le canal inactif, le canal prend en charge le service, le système en cours effectuera une adaptation du spectre pour faire don du peut être assemblé à SUr dans Lr , et le service de SUr ne pourra être démarré que lorsqu'un − 1 libre canal pour les SU nouvellement arrivés. Si tous les utilisateurs en cours ne sont pas en mesure de fournir le et des canaux existent dans le système. Si les deux SUh e SUr dans la file d'attente, n'utilisez pas le canal inactif, nombre de canaux requis, le SU nouvellement arrivé sera classé à la fin de la file d'attente correspondante. le canal peut être assemblé à SUe dans Le . De même, le service de SUe ne peut être démarré que Si la file d'attente est pleine, le service du SU sera bloqué. Cependant, comme tout le monde est plein, entrer dans la file d'attente vient de l'interruption , le service de sera forcé de se terminer, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de blocage .

• Événement D : départ du SU

Machine Translated by Google

lorsque w − 1 canaux inactifs existent déjà dans le système. Si aucune SU dans la file d'attente n'utilise le canal inactif, le canal sera assemblé aux SU en cours dans le système, conformément à la règle 1.

• Événement C : arrivée du SU

Il existe trois types d'arrivées SU dans le système, à savoir SUh e , SUe et SUr . le SU arrivant au système Si est SUh et il y a b canaux inactifs dans le système, alors le service du SUh nouvellement arrivé peut être démarré. De même, le service du SUe ou SUr nouvellement arrivé peut être démarré lorsque le nombre de canaux existant dans le système atteint la valeur minimale w ou a. Si les canaux gratuits du système ne peuvent pas prendre en charge le service, la SUe en cours effectuera une adaptation du spectre pour faire don du canal aux SU nouvellement arrivées. Si toutes les SUe en cours ne sont pas en mesure de fournir le nombre requis de canaux, la SU nouvellement arrivée sera classée à la fin de la file d'attente correspondante. Si la file d'attente est pleine, le service du SU sera bloqué. Cependant, comme tous les SUh e entrant dans la file d'attente sont pleins, le service de SUh sera obligé de

L_e^h h vient du SUe interrompu , quand L_e e se terminer, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de SUh bloqué e .

• Événement D : départ du SU

Le départ de SU libère toutes les chaînes agrégées. Autrement dit, le départ de SUe libère k (w ≤ k ≤ v) canaux ; le départ de SUR libère une chaîne ; et le départ de SUh

e libère les canaux b . Le schéma 1 est utilisé pour attribuer les canaux libérés par les SU, libres où est la somme du nombre de canaux libérés par les SU et du nombre de canaux libres N dans le système. S'il reste des canaux inactifs après que tous les SU en attente dans la file d'attente aient été assemblés, le canal inactif sera alloué au SUe en cours , conformément à la règle 1.

4. Analyse CTMC et mesures de qualité de service

Dans le processus d'accès au canal, les activités des utilisateurs déclenchent le changement de l'état du système. Les chaînes de Markov en temps continu (CTMC) sont utilisées pour établir une relation correspondante entre la transition d'état possible du système et les événements déclencheurs qui provoquent le changement de l'état du système, ce qui peut décrire le flux de ressources spectrales entre les SU multi-types . Par conséquent, l'analyse des performances du système secondaire peut être effectuée au moyen du CTMC. Les activités des SU peuvent être cartographiées dans l'espace de probabilité multidimensionnel. Ensuite, le modèle mathématique de la stratégie Ps-rq proposée peut être établi pour obtenir les métriques de QoS via la solution en régime permanent et les performances du système secondaire peuvent être évaluées.

4.1. Planification de l'analyse dynamique et de la modélisation

CTMC Notez qu'un état général est le suivant :

$$x = lw, \ldots, lv, ga, go, lpu, leq, lrq, lhq$$

où lm (w ≤ m ≤ v) est le nombre de SUe avec m canaux agrégés, ga est le nombre de SUr avec un canal agrégé, gb est le nombre de SUh avec b canaux agrégés, lpu est le nombre de PU dans le système et leq, lrq et lhq sont les longueurs de file d'attente actuelles de Le , Lr et L_e^h , respectivement.

De plus, l'ensemble des états réalisables du système peut être noté comme

$$S = lw, \ldots, lv, ga, gb, lpu, leq, lrq, lhq \geq 0 \; ; \; b(x) \leq M \; ; \; leq \leq Qéq \; ; \; lrq \leq Qrq; \; lhq \leq Qhq; \; \sum_{je=1}^{v-w} ilw+i < w, \text{ si } leq > 0 \quad (4)$$

Ici, Qeq, Qrq et Qhq sont respectivement les capacités totales de Le , Lr et L_e^h . si $leq > 0$ signifie que $\sum_{je=1}^{v-w} ilw+je < w$, si Le n'est pas vide, la somme du nombre maximum de voies

Machine Translated by Google

que tout SUe en cours peut donner sera toujours inférieur à son nombre minimum d'agrégation. b(x) est le nombre total de canaux utilisés à l'état x qui peut être décrit par :

$$b(x) = lpu + aga + bgb + \sum_{m=}^{v} wmlm \quad (5)$$

De plus, M − b(x) est le nombre de canaux inactifs dans le système (c'est-à-dire Nf ree supposé dans le schéma 1).

Afin d'analyser le taux de transition de l'état général x vers d'autres états, nous supposons que l'arrivée de l'utilisateur dans le système obéit à la loi de Poisson et le départ obéit à la loi exponentielle. Notez que le taux d'arrivée de PU est λp et le taux de départ est μp. Les taux d'arrivée de SUr et SUe sont respectivement λsr et λse, et les taux de départ sont μsr et μse . De plus, l'ordonnancement avec boucle de rétroaction de SUe peut faire en sorte que l'arrivée externe des services entrant dans Le et L n'obéisse plus à la distribution de Poisson. Pour simplifier notre analyse, nous supposons que le paramétrage de la boucle de rétroaction a peu d'effet sur les services dans Le et L et supposons que l'arrivée exogène de SU $_{e}^{h}$, les services obéissent tous à la distribution de Poisson.

Sur la base des hypothèses ci-dessus, en analysant le processus d'accès au canal, le modèle CTMC basé sur la stratégie Ps-rq est établi. Tous les états de destination, activités, taux de transition et conditions de transition possibles du système à partir de l'état général x sont développés.

• Événement A : arrivée du PU

À l'arrivée du PU, les transitions d'état du système secondaire à partir de l' état général x jusqu'à tous les événements déclencheurs possibles sont dérivées comme le montre la figure 4, et les conditions de transition pour tous les états possibles sont répertoriées dans la figure 5. À l'exception de l'état t1 dans Comme le montre la figure, il n'y a pas de canaux inactifs dans le système qui peuvent être directement attribués au PU arrivé. Ainsi, il existe M − b(x) = 0 de l'état t2 à l'état t35.

L'arrivée du PU peut préempter le service de n'importe quel SU. Pour l'état t4 à l'état t14 et l'état t16 à l'état t17 d'interruption de service sur la figure 5, cela indique que les SU dans ces états ne peuvent pas effectuer d'adaptation spectrale, c'est-à-dire m (w < m ≤ v), lm = 0. Puisque Lr n'a pas de boucle de rétroaction, le service du SUr interrompu sera forcé de se terminer, comme dans l'état t30 à l'état t32.

Dans l'état t3 et l'état t15, il peut y avoir deux cas où les SU n'effectuent pas d'adaptation spectrale : il n'y a aucun utilisateur secondaire dans le système qui peut effectuer l'adaptation, c'est-à-dire m (w < m ≤ v), lm = 0, ou les SU du système ne peuvent pas effectuer d'adaptation spectrale et m (h = m = v), lm > 0. Des conditions similaires doivent être remplies pour les états t18, t30 et t33.

De plus, puisque a = b < w, a = b ≤ w − 1. Autrement dit, les canaux libérés par l'entrée

SUe interrompu ne peut pas démarrer le service de SUe dans Le mais le service de SUr et SUh h Lr et L libérés par le SUe terminé de force , les canaux libérés par le $_{e}$ démarrage $_{e}$ peut être démarré, comme dans l'état t6 à l'état t14. C'est la même chose que les canaux interrompu ou terminé de SUr et SUh de tout service de SU dans la file d'attente. tels que dans l'état t21 à l'état t29. Cependant, ils ne

• Événement B : départ du PU $_{e}$ peuvent pas soutenir le

Lors du départ du PU, les transitions d'état du système secondaire à partir de l' état général x jusqu'à tous les événements déclencheurs possibles sont dérivées de la figure 6, et les conditions de transition pour tous les états possibles sont répertoriées sur la figure 7.

Dans ce cas, si la file d'attente L $_{e}^{h}$ n'est pas vide et b = 1, alors le service de SUh $_{e}$ dans la file d'attente peut être démarré directement. Si b > 1, alors M − b(x) = b − 1 est requis, c'est-à-dire qu'il existe b − 1 canaux dans le système, comme dans l'état t1. C'est la même chose que SUr tel que celui de l'état t2. Puisque a = b < w, c'est-à-dire w = 1, le service de SUe dans Le ne peut être démarré que sous la condition de M − b(x) = w − 1, comme dans l'état t3.

Machine Translated by Google

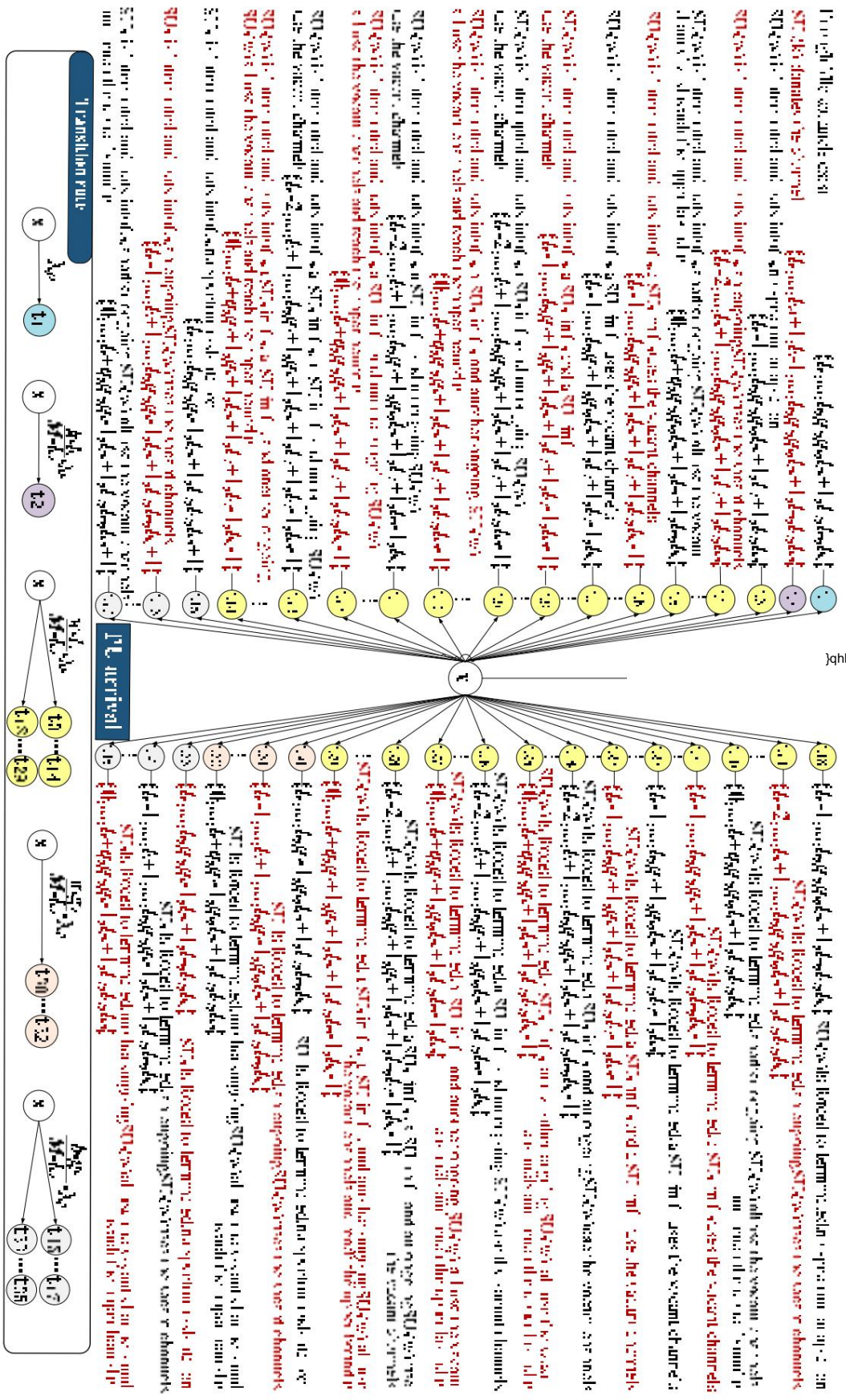


Figure 4. La transition du système de l'état général x à tous les états accessibles à l'arrivée du PU.

Machine Translated by Google

État	Conditions de transition	État	Conditions de transition
t1	M − xb > 0)(	t18	M − xb = ;0)(>w;0 eq Qeq l = ; ou (= = wm lvm), m > 0 (< ≤ wm lvm), m = 0;
t2	M − xb = ;0)(l k > ;0 k = max{ }w+1,...,v ;	t19	M − xb = ;0)(lw > ;1 éq Qeq l =; m= 2w ≤− v;1 = tout le rq QG = ;0 (wm ≤<),lvm m = ;0
t3	M − xb = ;0)(lw > ;0 éq Qeq l <; ou (), wm lvm m 0 (), wm lvm m 0;	.....	
t4	M − xb = ;0)(w > ;1 éq Qeq l < ; m = 2w ≤− v;1 rq = lhq = ;0 wm (vm≤), = ;0 m	t20	M − xb = ;0)(lw > ;1 jeeq Qéq; lq= − w ;1 l hq = = ;0 rq w (−≥)(lwv w +− ;1)1 = ;0 wm lvm (≤<), m
.....		t21	M − xb = ;0)(jeeq Qéq; siège ;0 w ≥− b;1 wm lvm (≤), = ;0 m
t5	M − xb = ;0)(lw > ;1 éq Qeq l <; = lq w − ;1 1 << vw ; w ≥(v−)(+− w1)1 (wm ≤<),lvm m = = ;0 rq hq =0	.....	
t6	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; > ;0 siège w ≥− b;1 (wm ≤<),lvm m = ;0	t22	M − xb = ;0)(jeeq Qéq; > ;0 q w ≥− a;1 = ;0 l QG (wm ≤<),lvm m = ;0
.....		.....	
t7	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; rq > ;0 w ≥− a;1 lhq = ;0 (wm ≤<),lvm m = ;0	t23	M − xb = ;0)(w > ;0 jeeq Qéq; rq > ;0 siège > ;0 w 1 +≥− ba ; (wm ≤),lvm m = ;0
.....		.....	
t8	M − xb = ;0)(lw > ;0 éq Qeq l <; rq > ;0 lhq > ;0 w 1 +≥− ba ;	t24	M − xb = ;0)(éq Qeq l =; lhq > ;0 lw > ;1 1 << VW ; wb 1 +<+−=−< abbwk ; wm lvm (≤), = ;0 m
.....		.....	
t9	M − xb = ;0)(eq Qeq l <; lhq > ;0 lw > ;1 1 << VW ; wb 1 +<+−=−< abbwk ; wm lvm (≤), = ;0 m	t25	M − xb = ;0)(éq Qeq l =; lhq > ;0 wb 1 −(−)lwvb w − ;1 lq=lw ;1 (wm < ≤),lvm m = ;0 1< < vw ;
.....		t26	M − xb = ;0)(éq Qeq l =; rq > ;0 lw > ;1 wb 1 +−=−< awk ; lhq = ;0 (wm ≤<),lvm m = ;0 1 << VW ;
t10	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; QG > ;0 wb lwvb=−<) − ;1 w = lq w − ;1 lw > ;1 (wm ≤<),lvm m = ;0 1 << VW ;	.....	
t11	M − xb = ;0)(eq Qeq l <; rq > ;0 lw > ;1 wb 1 +−=−< awk ; lhq = ;0 1 << vw ; (wm ≤<),lvm m = ;0	t27	− xbM = ;0)(éq Qeq l =; rq > ;0 = ;0(−+=−< − ;1) wb lwva w lhq lw > ;1 lq= ;1 w (≤<),lvmwm m = ;0 1 << vw ;
.....		t28	− xbM = ;0)(; eq=Ql eq w > ;1 rq > ;0 siège > ;0 w 1 −++=− wkba ; (≤<),lvmwm m = ;0 1 << vw ;
t12	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; rq > ;0 wb 1 −(−)lwva w − ;1 lhq = ;0 lq= ;1 w lw > ;1 (wm ≤<),lvm m = ;0 1 << vw ;	.....	
t13	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; w > ;1 rq > ;0 QG > ;0 w 1 −++=− wkba ; 1 << VW ; wm lvm (< ≤), = ;0 m	t29	− xbM = ;0)(éq Qeq l =; lhq > ;0 l q > ;0 lq=lw ;1 w 1 −++=−)(lwvba w −1); lvm(wm ≤) ;0vw m ;
.....		t30	− xbM = ;0)(ga > ;0 ou (), lvmwm m 0 ≤(), lvmwm m 0;
t14	M − xb = ;0)(éq Qeq l <; l ≥ ;0 l QG RG > ;0 lq= ;1 w > ;1 w 1 −++=−)(lwvba w −1); 1 << VW ; lvm(wm ≤), = ;0 m	t31	− xbM = ;0)(g m > ;0 ak −= ;1 1 ≤<< vkw ; > ;0 v lvm(wm (≤<), = ;0 m
t15	M − xb = ;0)(gb > ;0 hq Qhq l < ; ou (), wm lvm m 0 ≤(), wm lvm m 0;	.....	
t16	M − xb = ;0)(gb > ;0 jeeq QG ; bk −= ;1 1 ≤<< vkw ; lw > ;0 (wm ≤<),lvm m = ;0	t32	− xbM = ;0)(ga > ;0 = lq w ; une(+=) lwv w lw > ;0 (≤<),lvmwm m = ;0 1 << VW ;
.....		t33	− xbM = ;0)(go > ;0 hq Qhq l =; ou (), lvmwm m 0 lvmwm ≤< = m 0;
t17	M − xb = ;0)(gb > ;0 hq Qhq l <; = lq w ; b −(+) lwv w 1 << VW ; w > ;0 (wm ≤<),lvm m = ;0	t34	− xbM = ;0)(> ;0 b g hq Qhq l =; bk −= ;1 1 ≤<< vkw ; w > ;0 (≤<),lvmwm m = ;0
		.....	
		t35	− xbM = ;0)(go > ;0 jeeq QG ; = lq w ; b −(+) lwv w lw > ;0 (≤<),lvmwm m = ;0 1 << VW ;

Figure 5. Les conditions de transition du système de l'état général x à tous les états atteignables sur PU arrivée.

Machine Translated by Google

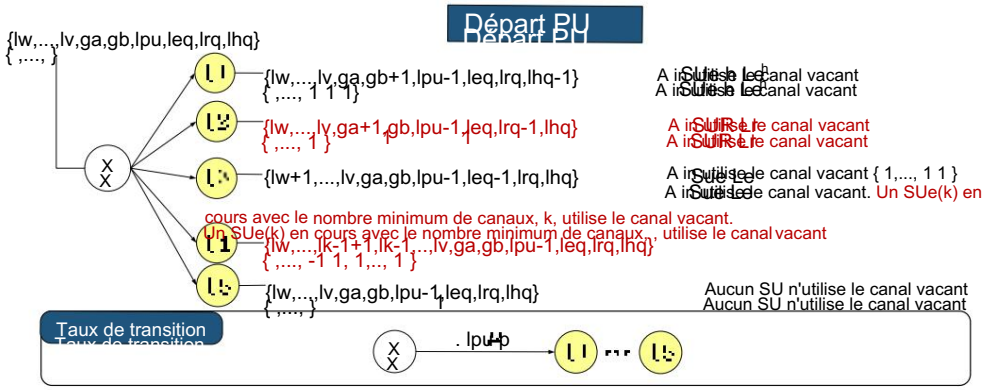


Figure 6. La transition du système de l'état général x à tous les états accessibles au départ du PU.

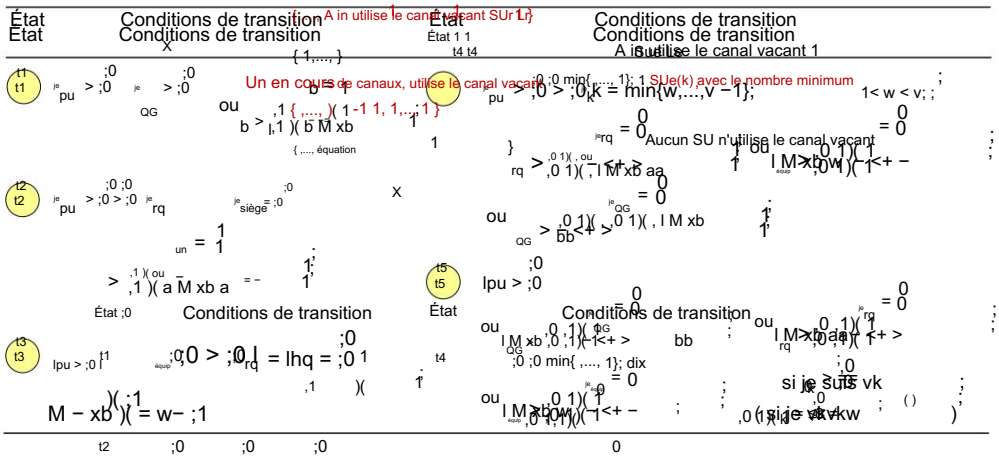


Figure 7. Les conditions de transition du système de l'état général x à tous les états atteignables sur PU départ.

• Événement C : arrivée du SU

A l'arrivée du SU, les transitions d'état du système secondaire à partir du l'état général x à tous les événements déclencheurs possibles sont dérivés comme le montre la figure 8, et le les conditions de transition pour tous les états possibles sont répertoriées dans la figure 9.

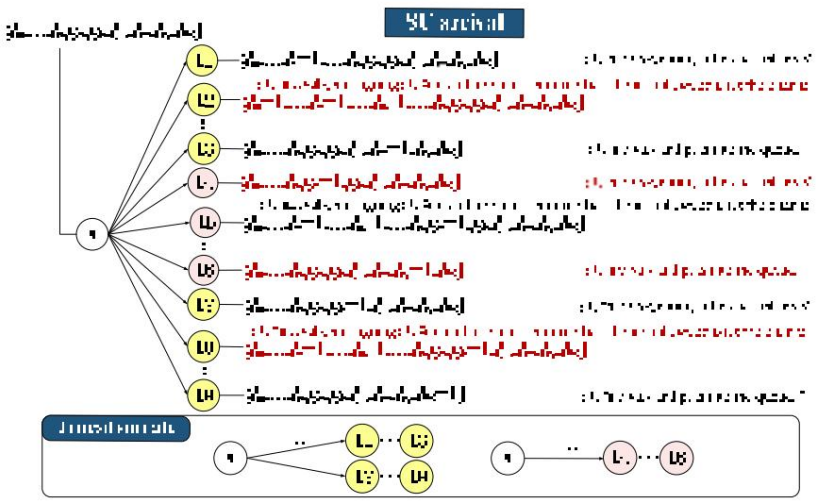


Figure 8. La transition du système de l'état général x à tous les états accessibles à l'arrivée du SU.

Machine Translated by Google

État	Conditions de transition	État	Conditions de transition
t1	M − xb)(> w;	t6	rq Qrql <; si Mvw xb)(< ( ) m lw un ; si w=Mvm xb a)(
t2	lm > ;0 m = max{w +1,..., v}; < vw ; mh +− M − xb)(= w;	t7	M − xb)(> b;
t3	éq Qeq l <; Mvw xb)(si w ( ) m < ; si w=Mvm xb w)(	t8	lm > ;0 m = max{w +1,..., v}; w < v; mh +− M − xb = b;)(
t4	M − xb)(> une;	t9	QHQ l < si Mvw xb ;)(( ) ; + ( ) m lw b m < ; si w Mvm xb b)(<
t5	lm > ;0 m = max{w+1,...,v}; mh +− M − xb)(= une;		

Figure 9. Les conditions de transition du système de l'état général x à tous les états accessibles sur SU (arrivée.

La condition de service de SUe peut être démarrée lorsque son arrivée est la somme de le nombre de canaux inactifs existant dans le système et le nombre de canaux qui peuvent être donnés par les SU en cours ne sont pas inférieurs à la limite inférieure de SUe , c'est-à-dire M − b(x) + $\sum_{m=w+1}^{v}$ (m - w) lm≥ w. Dans le cas contraire, il sera mis dans la file d'attente Le , à condition que leq < Qeq, comme dans l'état t3. SUR et SUh e arrivent de la même manière, c'est-à-dire l'état t6 et l'état t9.

• Événement D : départ du SU

Au départ du SU, les transitions d'état du système secondaire à partir du l'état général x à tous les événements déclencheurs possibles sont dérivés comme le montre la figure 10, et le les conditions de transition pour tous les états possibles sont répertoriées dans la figure 11.

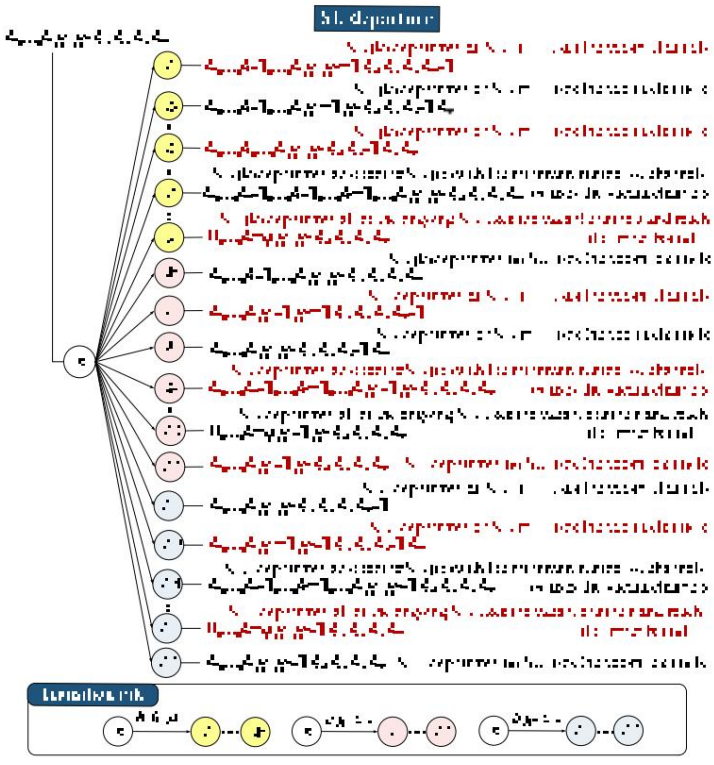


Figure 10. La transition du système de l'état général x à tous les états accessibles au départ du SU.

Machine Translated by Google

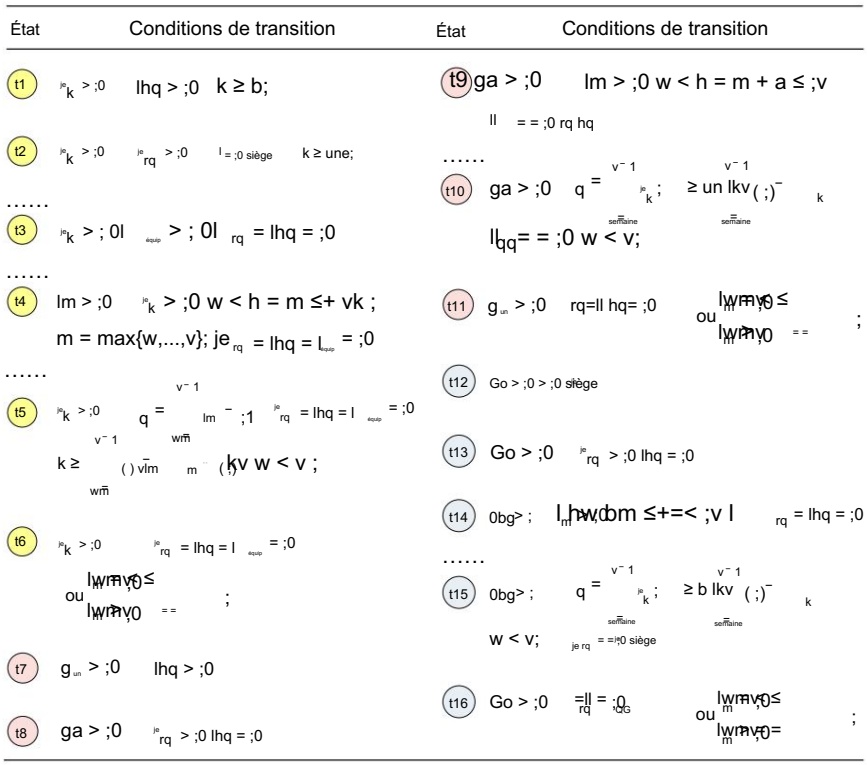


Figure 11. Les conditions de transition du système de l'état général x à tous les états atteignables sur Départ SU.

Dans ce cas, le nombre total de canaux inactifs utilisés par les SU en cours ne doit pas être supérieur au nombre de canaux libérés par les SU au départ, comme la condition de $k \geq \sum_{m=w}^{v-1} (v-m)\mu_m - (v-k)$ dans l'état t5. Ceci est similaire à celui des états t10 et t15.

4.2. Métriques de QoS

Grâce à la modélisation CTMC, toute activité possible de l'utilisateur peut déclencher la transition de tout état accessible ti vers un autre état accessible tj , comme le montrent les figures 4 à 11. qij (je, j S et i = j) représentent le taux de transition total, où S est l'ensemble d'états réalisables du système. Soit π(x) la probabilité en régime permanent du système, qui peut être calculée à partir de les équations d'équilibre et la condition de normalisation comme suit.

$$\pi(x)Q = 0, \sum_{x} \pi(x) = 1 \quad (6)$$

où π(x) est le vecteur de probabilité en régime permanent et Q est la matrice du taux de transition générée par le taux de transition qij. Les éléments diagonaux de la matrice des taux de transition Q, qii peuvent être trouvé comme $q_{ii} = -\sum_{j=je} q_{ij}$. Ainsi, les métriques de QoS du système secondaire basées sur La stratégie Ps-rq proposée peut être obtenue.

- La capacité du réseau fait référence au nombre moyen de services SU réalisés dans les CRN. par unité de temps (unité : paquet/unité de temps) [12]. Soient Ce , Cr les capacités de SUe , SUr , respectivement, on peut obtenir :

$$Cr = \sum_{x \in S} a_{ga}\mu_{sr}\pi(x), \quad (7)$$

$$Ce = \sum_{x \in S} \sum_{k=w}^{v} (k_{lk} + b_{gb})\mu_{se}\pi(x) \quad (8)$$

où x S est l'ensemble de tous les états possibles dans les systèmes contenus dans les figures 4 à 11.

Machine Translated by Google

• L'utilisation du spectre fait référence au rapport entre le nombre moyen de canaux utilisés et le nombre total de canaux disponibles [25], qui peut être déterminé par :

$$U = \sum_{x \in S} \pi(x) \frac{b(x)}{M} \quad (9)$$

où b(x) est le nombre total de canaux disponibles de l'état x, M est le nombre total de canaux dans le système et S est l'ensemble de tous les états de transition possibles contenus dans les figures 4 à 11.

• La probabilité de blocage fait référence à la probabilité que la SU nouvellement arrivée ne puisse pas être desservie en raison de l'occupation de tous les canaux du système. Étant donné que la file d'attente est définie pour les SU dans cette étude, le service du SU nouvellement arrivé sera bloqué lorsque la file d'attente correspondante est pleine. Il convient de noter que les SUh h sont les e entrant dans L SUe interrompus par le PU, mais pas les SU qui arrivent nouvellement dans le système.

e

Par conséquent, le SU$_e^h$ ne risque pas d'être bloqué.

Le SUe nouvellement arrivé sera bloqué si les deux conditions suivantes sont remplies : (1) la somme du nombre total de canaux inactifs dans le système et le nombre total de canaux pouvant être donnés par le SUe en cours ne sont pas suffisants pour démarrer. le service du SUe (c'est-à-dire que la limite inférieure de l'assemblage des canaux n'est pas atteinte) et (2) la file d'attente, Le , est pleine. Ainsi, la probabilité de blocage de SUe , P b ,

e peut être obtenu par :

$$P_b^e = \sum_{Aé} \pi(x) \quad (dix)$$

où l'ensemble Ae est la condition de déclenchement pour laquelle SUe est bloquée :

$$Ae = x \quad S, leq = Qeq, M - b(x) + \sum_{k=w+1}^{v} (k - w)lk < w$$

De même, le SUr nouvellement arrivé sera bloqué si les deux conditions suivantes sont remplies : (1) la somme du nombre total de canaux inactifs dans le système et le nombre total de canaux pouvant être donnés par le SUe en cours ne sont pas suffisants. pour démarrer le service du SUr et (2) la file d'attente, Lr , est pleine. Alors, la probabilité de blocage de SUr ,P peut être déterminée par : r b ,

$$P_b^r = \sum_{Ar} \pi(x) \quad (11)$$

où l'ensemble Ae est la condition de déclenchement pour laquelle SUe est bloquée :

$$Ar = x \quad S, lrq = Qrq, M - b(x) + \sum_{k=w+1}^{v} (k - w)lk < une$$

• La probabilité de terminaison forcée fait référence à la probabilité que les SU desservies soient forcées de se terminer en raison de l'arrivée d'une PU. En tant qu'ensemble de la boucle de rétroaction de SUe , la SUe interrompue par le PU peut retourner dans la file d'attente Le et Le via le classificateur de paquets II. Si la file d'attente correspondante est pleine, le service sera obligé de se terminer. h

En conséquence, le service SUh est forcé de se terminer lorsque les trois conditions suivantes sont remplies : (1) il n'y a pas de canaux inactifs dans le système ; (2) la SUe en cours ne peut pas effectuer une adaptation de spectre pour partager des canaux avec les SU interrompues et (3) la file d'attente h est pleine. Pour être plus précis, les états t33 à t35 sur la figure 4 indiquent que le PU anticipe tout SUh L e

e , e

avec b canaux agrégés, et le SUh est obligé de mettre fin. La résiliation forcée

Machine Translated by Google

probabilité de SUh e , $P_{f,}^{eh}$ peut être calculé par le rapport de la terminaison forcée moyenne probabilité au taux d'arrivée de SUh e , λse, comme suit :

$$Pf^{ein} = \sum_{B_e^h} \pi(x) \frac{\lambda pbgb}{(M - lpu)\lambda se} \quad (12)$$

h où B_e est l'ensemble des conditions pour lesquelles SUh est obligé de se terminer :

$$B_e^h = x \quad S, M = b(x), lpu < M, gb > 0, lhq = Qhq, \text{ ou } \begin{matrix} m(w < m \le v), lm = 0 \\ m(w = m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

De même, le service de SUe est forcé de se terminer lorsque les trois conditions suivantes sont remplies : (1) après avoir été préempté, le nombre de canaux restants de SUe est insuffisant pour démarrer le service, c'est-à-dire que la SUe avec w canaux agrégés est préemptée; (2) la SUe en cours ne peut pas effectuer une adaptation de spectre pour partager des canaux avec les SU interrompues et (3) la file d'attente, Le , est pleine. Sur cette base, les états t18 à t29 sur la figure 4 indiquent que le PU préempte toute SUe avec w canaux assemblés, et que la SUe est forcée de se terminer. La probabilité de terminaison forcée de SUe , P peut être obtenue par : f , $_e$

$$Pf^{e} = \sum_{Être} \pi(x) \frac{\lambda pwlw}{(M - lpu)\Lambda e} \quad (13)$$

où Λe représente le taux d'arrivée de SUe qui n'est pas bloqué :Λe = λse(1 − P l'ensemble des $_b^e$) et Be est conditions pour lesquelles SUe est obligé de se terminer :

$$Be = x \quad S, M = b(x), lpu < M, lw > 0, leq = Qeq, \text{ ou } \begin{matrix} m(w < m \le v), lm = 0 \\ m(w = m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

Puisque la boucle de rétroaction n'est pas définie pour la file d'attente Lr , si les deux conditions suivantes sont remplies, le service de SUr est forcé de se terminer : (1) il n'y a aucun canal inactif dans le système pour continuer son service et (2) le service en cours SUe ne peut pas faire don des chaînes pour cela. Sur cette base, les états t30 à t32 sur la figure 4 indiquent que le PU préempte tout SUr avec des canaux agrégés et que le SUr est forcé de se terminer. La probabilité de terminaison forcée de SUr , peut être obtenue par : $P_{f,}^{r}$

$$Pf^{r} = \sum_{Br} \pi(x) \frac{\lambda paga}{(M - lpu)\Lambda r} \quad (14)$$

où Λr représente le taux d'arrivée de SUr qui n'est pas bloqué :Λr = λsr(1 − P l'ensemble des $_b^r$) et Br est conditions pour lesquelles SUr est obligé de se terminer :

$$Br = x \quad S, M = b(x), lpu < M, ga > 0, \text{ ou } \begin{matrix} m(w < m \le v), lm = 0 \\ m(w = m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

5. Analyse des performances de la stratégie Ps-rq proposée 5.1. Comparaison et analyse des caractéristiques du modèle

Dans cette section, nous comparons la stratégie Ps-rq proposée avec deux schémas d'allocation de canaux classiques (référence [12], 2014) ainsi qu'avec deux nouveaux (référence [18], 2020 et référence [9], 2022), visant à illustrer les caractéristiques de la stratégie proposée. La comparaison des caractéristiques du modèle est présentée à la figure 12.

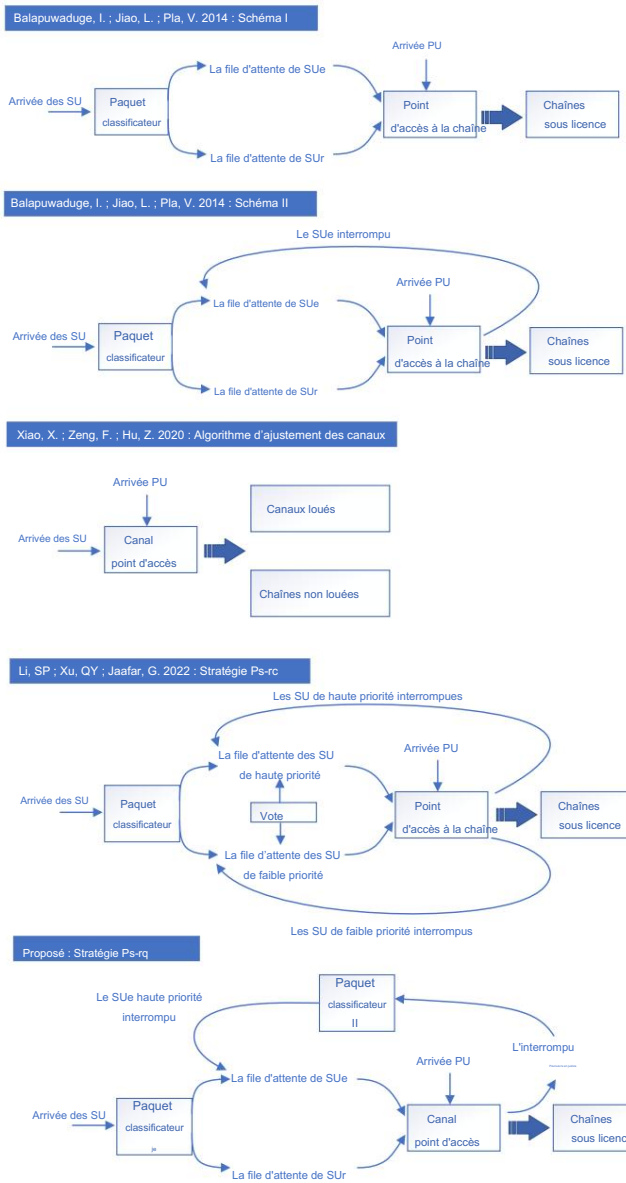
Machine Translated by Google

. erormance nayss oe ropose s-rq raegy

5.1. Comparaison et analyse des caractéristiques du modèle

Dans cette section, nous comparons la stratégie Ps-rq proposée avec deux schémas d'allocation de canaux classiques (référence [12], 2014) ainsi qu'avec deux nouveaux schémas (référence [18], 2020). et référence [9], 2022), visant à illustrer les caractéristiques de la stratégie proposée.

La comparaison des caractéristiques du modèle est présentée à la figure 12.



Type de trafic	Renforcement des capacités	Mérites	Limites
Service hétérogène	/	· Schéma simple · Retarder les applications critiques	· Forte probabilité de résiliation forcée · Appliquer uniquement lorsque PU n'est pas actif
Service hétérogène	Boucle de rétroaction	· Réduire les licenciements forcés probabilité · Applications tolérantes aux retards	·La file d'attente de SUe provoque un problème de service de famine
/	Location de spectre	· Schéma simple · Forte réalisabilité	·La capacité du réseau est affectée par l'échelle du spectre loué · Les services hétérogènes sont pas considéré
Service prioritaire	Sondage, boucle de rétroaction	· Assurer les services prédéfinis hautement prioritaires	·La priorité doit être définie lors de l'initialisation du réseau · Difficile de s'adapter à l' environnement réseau changeant
Service hétérogène	Boucle de rétroaction	· Soulager la famine problème de SUe · Programmation équitable	· Les types de services sont divisés en détails ·Haute complexité de planification

Figure 12. La comparaison des caractéristiques du modèle [9,12,18].

Les modèles de recherche mentionnés, comme le montre la figure 12, visent à renforcer la capacité des réseaux secondaires. En employant la méthode d'analyse aléatoire et en établissant la chaîne de Markov en temps continu correspondante pour une analyse systématique, des mesures de performance sont dérivées pour évaluer l'efficacité des programmes de recherche. Cependant, les études mentionnées ont rencontré des difficultés pour distinguer les types de services, comme démontré dans [9,18], ou ont rencontré des limites dans la mise en œuvre d'applications de services différenciées. en raison des contraintes de l'environnement réseau, comme celles de [12].

Ces limites servent d'inspiration à la stratégie décrite dans cet article. Le La stratégie Ps-rq proposée dans cet article vise à fournir une différenciation plus équitable service en abordant le problème de la famine. Pour y parvenir, nous utilisons des classificateurs de paquets I et II pour effectuer deux niveaux de différenciation de service. Le but du classificateur de paquets I est pour diviser les SU arrivant en SUe et SUr . Considérant que si le SUe interrompu par le Le PU est tous en attente de remise en service, cela conduira inévitablement au problème de famine d'un autre file d'attente. Le modèle proposé dans cet article prend donc en compte les exigences de service des le SUe haute priorité partiellement interrompu et intègre le classificateur de paquets 2 pour garantir une prestation de services tout en proposant des services différenciés, ce qui représente un aspect notable

Machine Translated by Google

de notre cadre de recherche. Cependant, la complexité de la stratégie de planification proposée reste difficile à contourner à la lumière du raffinement de la classification des services. Ensuite, nous procéderons à une analyse détaillée des performances de la stratégie de recherche Ps-rq présentée dans cet article.

5.2. Simulation et analyse numériques

Pour illustrer les performances du système secondaire basé sur la stratégie d'assemblage de canaux proposée, dans cette section, les résultats de simulation numérique des services élastiques et des services en temps réel sont présentés sur la base de MATLAB. Les résultats de simulation sont basés sur la procédure de réduction dimensionnelle des chaînes de Markov de grande dimension. Afin de vérifier le modèle développé, nous présentons les résultats de simulation des performances du système secondaire sous différents taux d'arrivée des utilisateurs primaires. Les paramètres de base de la simulation numérique sont définis comme suit.

Le nombre de PU dans le système est fixé à 6 (M = 6) et l'expérience numérique est réalisée dans un CRN avec six canaux partageant la bande passante spectrale. Le taux d'arrivée du PU est défini comme λp = 1 et le taux de départ est défini comme μp = 0,5. Le taux d'arrivée et le taux de départ du service élastique sont fixés respectivement à λse = 2 et μse = 1, et celui du service en temps réel est fixé à λsr = 1 et μsr = 1. Notez que l'unité de ces paramètres est « sessions par unité de temps ». En attribuant des valeurs spécifiques à ces paramètres, telles que 0,5 sessions/s et la longueur du flux en bits, la capacité peut être quantifiée en termes de kbps ou Mbps.

Les paramètres dynamiques du système a, b, w, v, Qeq, Qrq, Qhq) dans le processus d'accès au spectre sont définis comme a = b = 1, w = 2, v = 4, Qeq = 2, Qrq = 1 et Qhq = 1. Le coefficient de partage proportionnel est α : β = 1 : 1. Sur la base des paramètres système ci-dessus, l'état général x du système dans la section 4.1 peut être spécifié :

$$(\,l_2\,l_3\,l_4\,g_1\,g_1^{3\;2\;1}{}_{6\,6}\quad l_{pu}^{6}\;Q_{éq}^{2}\;Q_{rq}^{1}\;Q_{hq}^{1}) \tag{15}$$

où li (i = 2, 3, 4) représente SUe qui agrège i canaux et ga, gb représentent SUr avec a canaux agrégés ou SUh avec b canaux agrégés (a = b = 1) ; l'exposant de chaque position indique la limite supérieure du nombre d'utilisateurs à la position correspondante

position, telle que l_3^2, qui indique qu'il y a au plus deux SUe assemblant trois

canaux dans le système en même temps, l_{pu}^{6}, ce qui signifie qu'il existe au plus six PU dans le système.

système à la fois et Q_{eq}^{2}, ce qui indique que la capacité maximale de la file d'attente Le est de 2.

La simulation numérique est basée sur l'état général paramétré. La procédure de réduction dimensionnelle des chaînes de Markov de grande dimension est présentée comme suit.
Étant donné que l'état général supposé dans cet article est de grande dimension, il est difficile de générer directement la matrice de taux de transition Q. Par conséquent, nous envisageons de déclasser les marqueurs de haute dimensionnalité. Théoriquement, la taille de la matrice Q est de 2 592 × 2 592, qui est générée par le produit des exposants de l'équation (15). Prenez n'importe quel état général I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) existant dans le système pour montrer le processus de rétrogradation comme suit.
L'état I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) indique que le système a un SUe en cours avec deux canaux agrégés, un SUr en cours avec un canal agrégé, un SUh en cours avec un canal agrégé et un PU en cours. Il existe donc cinq flux dans le système dans cet état. En conséquence, l'état I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) peut être marqué comme l'état I5, −, où la première position de l'indice représente le nombre total de flux coexistants dans le système, et la deuxième position est le comptage dans l'ordre, et la limite supérieure est la somme des états de combinaison possibles avec cinq flux dans le système. Si une arrivée d'utilisateur se produit dans le système dans cet état, comme une arrivée de PU, alors la transition d'état correspondante est (1 0 0 1 1 1 0 0 0) → (1 0 0 1 1 2 0 0 0). Dans ce cas, six flux coexistent dans le système et le processus de transition est marqué comme I5, − → I6, − .

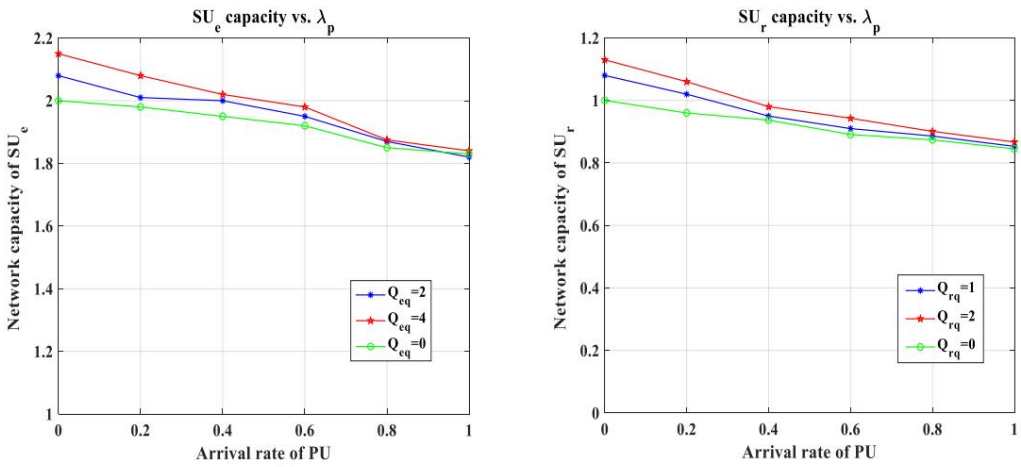
Si un départ d'utilisateur survient dans

Machine Translated by Google

le système dans cet état, comme un SUh e départ, puis la transition d'état correspondante est (1 0 0 1 1 1 0 0 0) → (0 1 0 1 0 1 0 0 0). Dans ce cas, quatre flux coexistent dans le système et le processus de transition est marqué comme l5, − → l4, − . D'après les figures 4 à 11, les événements de transition possibles et les taux de transition du système dans n'importe quel état général peuvent être obtenu, puis la matrice des taux de transition Q peut être développée. Par ailleurs, le La probabilité en régime permanent π(x) peut être résolue et les mesures de performance du secondaire système, y compris sa capacité de réseau, son utilisation du spectre, sa probabilité de blocage et ses la probabilité de terminaison peut être simulée davantage. Nous utilisons MATLAB pour résoudre le Markov modéliser et réaliser des simulations. Sur cette base, quatre cas d'études sont présentés et la chaîne l'assemblage des performances basé sur la stratégie Ps-rq proposée est analysé.

Cas 1 : capacité du réseau secondaire vs taux d'arrivée des PU

La figure 13 montre la relation entre la capacité du réseau de SUe et SUr et la taux d'arrivée des PU. Comme le montre la figure, la capacité du réseau secondaire diminue avec l'augmentation du taux d'arrivée des PU. Lorsque le nombre de PU entrant dans le système augmente, la priorité absolue d'accès aux données réduira le nombre total de données disponibles canaux restants dans le système, donc le nombre de SU qui peuvent accepter les services dans le Le système diminuera également en conséquence. En conséquence, la capacité du réseau de SUe et SUr diminue avec l'augmentation du taux d'arrivée des PU.



(un) (b)

figure 13. (a) Capacité du réseau de SUe ; (b) Capacité du réseau de SUr. Figure 13. (a) Capacité du réseau de ; (b) Capacité du réseau de la .

Cependant, il ressort de la figure 13 que l'augmentation de la capacité totale de la file d'attente de SU augmente la capacité du réseau secondaire. À λp = 0,2, la capacité du la file d'attente de SUe , Qeq, augmente de 0 à 4, et la capacité du réseau secondaire augmente de capacité de la file d'attente de SUr , Qrq, passe de 0 à 4, soit une augmentation de 9,43% Une fois la capacité de la file d'attente augmentée, le nombre de SU flux pouvant coexister dans le système, ils augmenteront, augmentant ainsi la probabilité que le SU pourra accepter le service. En comparant la figure 13, il n'est pas difficile de constater que le gradient de la capacité du réseau de SUr est inférieure à celle de SUe . Ceci est dû au fait de service plus élevée que SUe (sauf pour le SUh interrompu)), il est donc plus facile de démarrez le service pour le SUr nouvellement arrivé que SUe.

Cas 2 : utilisation du spectre par rapport au taux d'arrivée de SUe

La relation entre l'utilisation du spectre et le taux d'arrivée des SU est la suivante : Figure 14 avec le taux d'arrivée de comme axe des x. Cela ressort du chiffre 4,8% ; la l'utilisation du spectre augmente avec l'augmentation du taux d'arrivée. en capacité du réseau secondaire. = , le taux d'utilisation du spectre atteint 92,3 %. Avec l'augmentation des taux d'arrivée des SU, le spectre inactif est pleinement utilisé. Lorsque le spectre utilisé la descente de vient saturé progressivement, le dégradé va diminuer. De plus, il n'est pas difficile que SUr ait une priorité que l'augmentation de la capacité de la file d'attente peut augmenter la capacité du réseau secondaire, L'utilisation de l'huile est d'autant améliorée.

Cas 2 : utilisation du spectre par rapport au taux d'arrivée de SUe

La relation entre l'utilisation du spectre et le taux d'arrivée des SU est illustrée dans Figure 14 avec le taux d'arrivée de SUe comme axe des x. On peut voir sur la figure que le l'utilisation du spectre augmente avec l'augmentation du taux d'arrivée. Lorsque Qrq = 2, Qeq = 4, le taux d'utilisation du spectre atteint 92,3 %. Avec l'augmentation du taux d'arrivée des SU, le spectre inactif est pleinement utilisé. Quand l'utilisation du spectre devient saturée

Machine Translated by Google

La relation entre l'utilisation du spectre et le taux d'arrivée des SU est représentée sur la Figure 14, le taux d'arrivée étant l'axe des x. Il ressort de la figure que l'utilisation du spectre augmente avec l'augmentation du taux d'arrivée. Quand

= = , le taux d'utilisation du spectre atteint 92,3 %. Avec l'augmentation du taux d'arrivée des SU, le spectre inactif est pleinement utilisé. Lorsque l'utilisation du spectre devient progressivement saturée, le gradient diminue. De plus, il n'est pas difficile de constater que l'augmentation progressivement, la pente va diminuer. De plus, il n'est pas difficile de constater que l'augmentation de la capacité de la file d'attente peut augmenter la capacité du réseau secondaire, donc l'utilisation du spectre est la capacité de la file d'attente peut augmenter la capacité du réseau secondaire, donc l'utilisation du spectre est améliorée en conséquence. L'utilisation du spectre est donc d'autant améliorée.

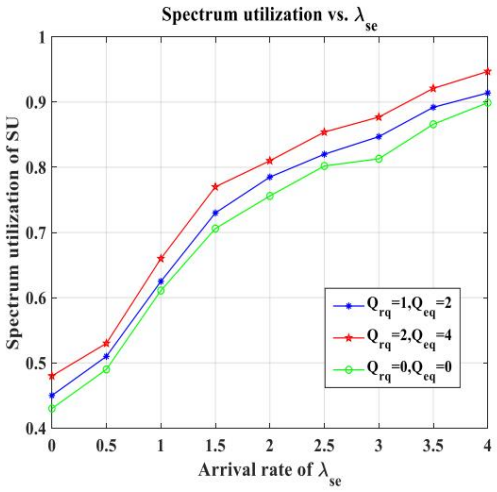


Figure 14. Utilisation du spectre des SU.

Figure 14. Utilisation du spectre des SU.

Cas 3 : probabilité de blocage vs taux d'arrivée des PU

Cas 3 : probabilité de blocage vs taux d'arrivée des PU

La figure 15 montre la relation entre la probabilité de blocage des SU et le taux d'arrivée des PU. En général, la probabilité de blocage des SU augmente avec l'arrivée La figure 15 montre la relation entre la probabilité de blocage des SU et le taux d'arrivée des PU. En général, la probabilité de blocage des SU augmente avec le taux d'arrivée des PU. Les canaux inactifs sont pleinement utilisés lorsque le nombre de PU dans le système augmente en raison de la priorité absolue d'accès aux données, ce qui entraîne une augmentation du blocage. de SU. Comme il a une priorité plus élevée que la probabilité de blocage, l'accès aux données est inférieur à celui de SUe . probabilité de blocage des SU. Puisque SUr a une priorité plus élevée que SUe, la probabilité de blocage de d'accès aux données est inférieur à celui de .

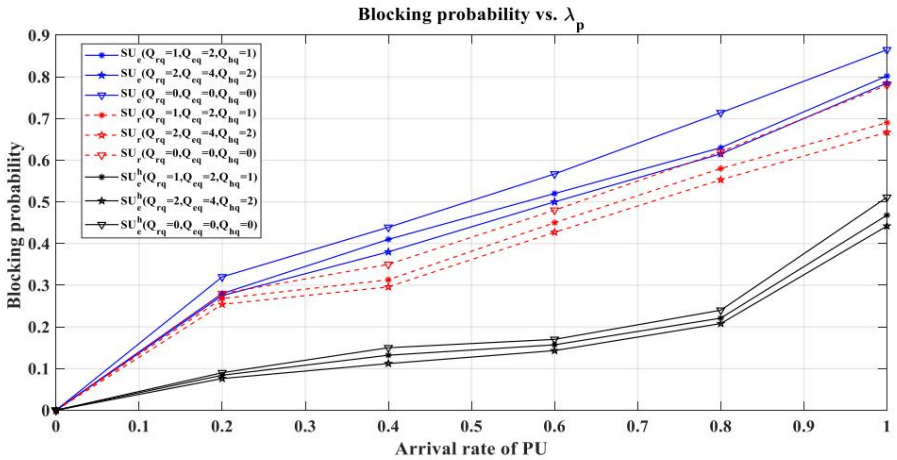


Figure 15. Probabilité de blocage des SU.

Figure 15. Probabilité de blocage des SU.

Il apparaît que les deux courbes sont relativement stables et la différence de probabilité de blocage n'est pas supérieure à 0,1. Cela illustre le fait que la stratégie Ps-rq proposée peut

la capacité n'est pas supérieure à 0,1. Cela illustre le fait que la stratégie Ps-rq proposée peut faire en sorte que SUe et SUr aient une performance stable sur la base de la réduction de la probabilité de blocage.

capacité des utilisateurs hautement prioritaires SUe . L'adoption de services différenciés offre une plus grande probabilité d'utilisateurs hautement prioritaires. L'adoption de services différenciés permet une planification de compromis équitable sans provoquer de faim excessive pour les utilisateurs peu prioritaires.

facteurs (SUs). Cependant, la capacité limitée dans notre système existant laisse un espace d'amélioration

système secondaire . Cependant, la capacité limitée dans notre système existant laisse un espace d'amélioration Cependant, la capacité limitée dans notre système existant laisse un espace d'amélioration.

Machine Translated by Google

Par exemple, pour SUr , lorsque le taux d'arrivée de PU est λp = 0,6, la probabilité de blocage est réduite de 10,82 % lorsque la capacité de la file d'attente est Qrq = 2, Qeq = 4 par rapport à Qrq = 0, Qeq = 0. Et pour SUe , lorsque λp = 0,6, la probabilité de blocage est réduite de 11,04% sous la même valeur. Ceci explique que le système peut fournir des services pour plus flux avec l'augmentation de la capacité de la file d'attente, ce qui offre plus de possibilités pour le accès spéculatif des SU. Par comparaison, on peut observer que l'augmentation de la file d'attente Cette capacité peut améliorer considérablement les performances de SUe . La raison est qu'un feedback la boucle est définie pour le service de SUe dans la stratégie Ps-rq proposée et une plus grande capacité de file d'attente est installé lors de la configuration du système.

Cas 4 : probabilité de terminaison forcée par rapport au taux d'arrivée des PU

La figure 16 montre la relation entre la probabilité de terminaison forcée des SU et le taux d'arrivée des PU. Comme le montre la figure, la probabilité de terminaison forcée de SU augmente avec le taux d'arrivée des PU, qui est également déterminé par l'accès aux données priorité des PU. Puisqu'une file d'attente réservée est définie pour le SUh interrompu $_{e}$, la résiliation forcée probabilité de SUh $_{e}$ est la plus basse de la figure 16, par exemple à la valeur de différence maximale, λp = 0,8, lorsque Qrq = 1, Qeq = 2, Qhq = 1, la probabilité de terminaison forcée de SUh $_{e}$ est 29,23% inférieur à celui du SUe et 42,5% inférieur à celui du SUr . Cependant, en raison du réglage de la boucle de rétroaction pour SUe , SUr a une probabilité de terminaison forcée plus élevée que Poursuivre en justice . Par conséquent, le SUe interrompu peut retourner dans la file d'attente et ne sera pas obligé de terminé jusqu'à ce que la file d'attente soit pleine.

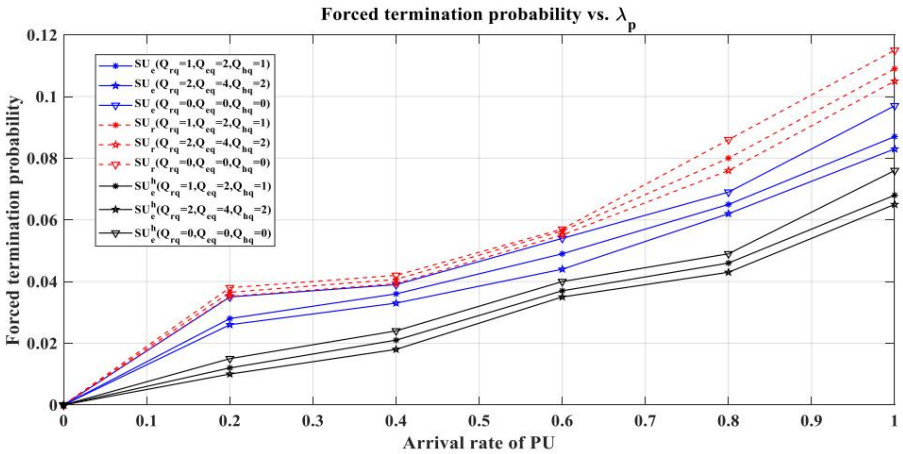


Figure 16. Probabilité de terminaison forcée des SU.

Les services en temps réel sont plus sensibles aux retards et à la perte de paquets causée par une légère instabilité ne provoque pas d'interférences sérieuses avec la qualité de la voix/image en temps réel. Donc pas de retour la boucle arrière est adoptée pour . Le taux d'occupation total du canal peut ainsi être réduit au prix d'une augmentation de la probabilité de terminaison forcée de SUr . Pris dans son ensemble, le manière, mais au prix d'une augmentation de la probabilité de terminaison forcée de . La stratégie Ps-rq proposée peut différencier les priorités de service des services hétérogènes et leur fournir une planification équitable. Sur cette base, la qualité de service des clients prioritaires services et leur fournir des horaires équitables. Sur cette base, la qualité de service du service élastique, SUh $_{e}$, qui est interrompu par les PU peut être amélioré. le service élastique hautement prioritaire, interrompu par les PU, peut être amélioré.

Pour démontrer davantage la supériorité de la stratégie proposée dans l'amélioration de la stratégie Ps-rq en ce qui concerne la performances des SU, une comparaison est fournie entre la stratégie Ps-rq et les résultats de comparaison non-Ps, probabilité de terminaison forcée, comme le montre la figure 17. rq concernant la probabilité de terminaison forcée, comme le montre la figure 17. Comme le montre la figure, que ce tous survenus dans les conditions initiales Qeq = 2 et Qrq = 1. Comme on peut le constater soit pour SUe ou SUr , lorsque la stratégie n'est pas adoptée, la stratégie les résultats de comparaison se sont tous produits dans les conditions initiales = 2 et = 1. Comme cela peut être le cas, la probabilité de terminaison forcée pour les SU augmente considérablement. L'analyse des performances de la figure, que ce soit lorsque la stratégie n'est pas adoptée, la est spécifique à la stratégie proposée dans ce document, il n'y a donc aucune comparaison entre

la probabilité de terminaison forcée de SUh $_{e}$ lorsqu'il n'adopte pas Ps-rq. La figure illustre la probabilité de licenciement forcé pour les SU augmente considérablement. L'analyse des performances selon laquelle l'augmentation de la probabilité d'arrêt forcé pour SUe est supérieure à celle pour SUr est spécifique à la stratégie proposée dans cet article ; ainsi, il n'y a pas de comparaison en l'absence de Ps-rq. Surtout lorsque le taux d'arrivée de PU est faible, SUe en a plus la probabilité de terminaison forcée en cas de non-adoption de Ps-rq. La figure montre que l'augmentation de la probabilité de terminaison forcée pour est supérieure à celle pour en l'absence de Ps-rq. Surtout lorsque le taux d'arrivée du PU est faible, a plus de possibilités d'accéder à la chaîne. Il ressort clairement de la stratégie proposée que l'excellent résultat peut être attribué à l'amélioration des performances de .

Machine Translated by Google

la probabilité de licenciement forcé pour les SU augmente considérablement. L'analyse des performances de est spécifique à la stratégie proposée dans ce document ; ainsi, il n'y a pas de comparaison de la probabilité de terminaison forcée en cas de non-adoption de Ps-rq. La figure montre que l'augmentation de la probabilité de terminaison forcée pour est supérieure à celle pour a en l'absence de Ps-rq. Surtout lorsque le taux d'arrivée du PU est faible, plus de possibilités d'accéder à la chaîne. Il ressort clairement de la stratégie proposée que les opportunités d'accéder au canal. Il ressort clairement de la stratégie proposée que l' excellent résultat peut être attribué à l'amélioration des performances de SUh. e .

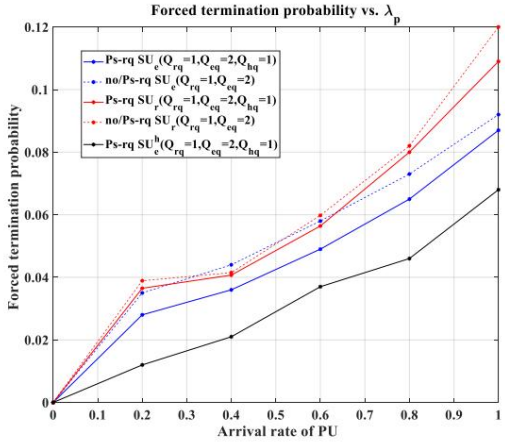


Figure 17. Comparaison de la probabilité de terminaison forcée avec et sans Ps-rq.

Figure 17. Comparaison de la probabilité de terminaison forcée avec et sans Ps-rq.

6. Conclusions

Cette étude conçoit et propose une stratégie d'ordonnancement prioritaire avec file d'attente réservée (stratégie Ps-rq) pour les CRN. Cette stratégie adopte le schéma de classification des services combinant des facteurs statiques (type de message) et des facteurs dynamiques (validité des informations, corrélation des messages et taille du message), qui peuvent différencier les services élastiques à haute priorité sur la base de la classification hétérogène des services dans les services secondaires. En définissant une nouvelle file d'attente réservée pour les services élastiques vitaux, la stratégie proposée peut améliorer la priorité des services élastiques de haute priorité interrompus par les PU. De plus, le contrôle flou Takagi – Sugeno est utilisé pour prioriser les services élastiques, et une vue prioritaire 3D des services élastiques est présenté Sur cette base, un schéma d'attribution de canaux proportionnel avec priorité qui est combiné avec une technologie d'assemblage de canaux et une technologie d'adaptation de spectre est fourni sur la base de la stratégie Ps-rq. En divisant les activités des utilisateurs dans les CRN en quatre événements, à savoir l'arrivée de PU, le départ de PU, l'arrivée de SU et le départ de SU, le flux de ressources dans le réseau secondaire est étudié et le processus d'accès dynamique au canal basé sur la stratégie Ps-rq est donné. En établissant le CTMC, le processus de flux de ressources dans le réseau secondaire est mappé sur l'espace d'état de grande dimension, et tous les états de transition, taux de transition et conditions de transition possibles déclenchés par les quatre types d'événements qui partent d'un état général sont dérivés. Après avoir déclassé les marqueurs de grande dimension, la solution en régime permanent du système peut être obtenue en acquérant la matrice de taux de transition, et une série d' indices d'évaluation des performances tels que la capacité du réseau secondaire, l'utilisation du spectre, la probabilité de blocage et la probabilité de terminaison forcée sont en outre obtenu.

De plus, nous comparons la stratégie Ps-rq proposée avec quatre schémas d'assemblage de canaux pour démontrer son adéquation à des scénarios spécifiques impliquant la transmission de trafic élastique. En combinant la procédure de réduction dimensionnelle des chaînes de Markov de grande dimension, nous simulons numériquement les résultats analytiques des indices de performance à l'aide de MATLAB et proposons quatre cas d'étude. Les résultats de la simulation indiquent que, dans la même dimension, à mesure que la capacité tampon augmente, la capacité du réseau du SUe augmente de 4,8 % et la probabilité de blocage diminue de 11,04 %, tandis que la capacité du réseau du SUr augmente de 9,43 % et la probabilité de blocage la probabilité diminue de 10,82 %. Et la probabilité de terminaison forcée des services élastiques hautement prioritaires concernés dans cet article est inférieure de 29,23 % à celle de SUe et de 42,5 % inférieure à celle de SUr . Les résultats numériques montrent que la stratégie proposée peut contribuer à améliorer la priorité des services élastiques de haute priorité qui sont interrompus par des PU dans les CRN et à réduire la probabilité de terminaison forcée sur la base d'une planification équitable.

Machine Translated by Google

Contributions de l'auteur : QX a effectué des recherches dans la littérature, conçu les concepts d'étude, fourni les modèles mathématiques, conçu l'algorithme, réalisé des simulations numériques, pris en charge la préparation de l'ébauche originale et édité le manuscrit ; SL a conçu les concepts de l'étude, amélioré la méthodologie systématique de recherche et d'analyse et supervisé l'achèvement du perfectionnement de l'article ; JG et YH ont donné de précieuses suggestions de révision et vérifié la déduction des formules et la grammaire anglaise. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manusc

Financement : Cette recherche a été financée en partie par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (61663024) et le projet de fonds doctoral en sciences naturelles de l'Université aéronautique de Xi'an (2022KY0201).

Déclaration de disponibilité des données : les données à l'appui de cet article proviennent d'études et d'ensembles de données précédemment rapportés, qui ont été cités.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Commission fédérale des communications. Rapport du Groupe de travail sur la politique du spectre. Dossier ET ; n° 02-135 ; Communications fédérales Commission : Washington, DC, États-Unis, 2002.
2. Huang, XL ; Li, YX; Gao, Y. Accès au spectre basé sur l'apprentissage Q pour la transmission multimédia sur les réseaux radio cognitifs. IEEETrans. Cogn. Commun. Réseau. 2021, 7, 110-119. [Référence croisée]
3. Srikar, D. ; Nella, A. ; Mamidi, R. Un nouveau système d'antenne radio cognitive de détection UWB intégrée et de communication MIMO à 8 éléments . Électronique 2023, 12, 330. [CrossRef]
4. Muzaffar, MU ; Sharqi, R. Un examen de la détection du spectre dans les réseaux radio cognitifs modernes. Télécommun. Système. Modèle. Anal. Des. Gérer. 2024, 2, 85. [Réf. croisée]
5. Ahmad, W. ; Radzi, N. ; Samidi, Technologie FS 5G : vers un partage dynamique du spectre à l'aide de réseaux radio cognitifs. Accès IEEE 2020, 8, 14460-14488. [Référence croisée]
6. Azaly, N. ; Badran, EF Amélioration des performances de l'accès dynamique au spectre via la réservation de canaux pour la radio cognitive Réseaux. Fil. Pers. Commun. 2021, 118, 2867-2883. [Référence croisée]
7. Lei, J. Agrégation et fragmentation de canaux pour les flux de trafic ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020.
8. Liu, X. ; Jia, M. Allocation intelligente des ressources du spectre basée sur l'optimisation conjointe de la radio cognitive hétérogène. IEEETrans . Émerger. Haut. Calculer. Intell. 2020, 4, 5-12. [Référence croisée]
9. Li, SP; Xu, QY ; Jaafar, G. Modélisation et analyse des performances de l'assemblage de canaux basé sur la stratégie Ps-rc avec des files d'attente prioritaires dans les CRN. Fil. Commun. Foule. Calculer. 2022, 17, 6384261. [CrossRef]
10. Ma, L. ; Xu, Y. ; Fu, Y. Un schéma de planification des ressources pour l'agrégation du spectre dans les systèmes hétérogènes basés sur la radio cognitive Réseaux. Commune de Chine. 2015, 12, 100-111.
11. Jiao, L. ; Li, FY; Pla, V. Modélisation et analyse des performances de l'assemblage de canaux dans les réseaux radio cognitifs multicanaux avec adaptation du spectre. IEEETrans. Véh. Technologie. 2012, 61, 2686-2697. [Référence croisée]
12. Balapuwaduge, I. ; Jiao, L. ; Pla, V. Assemblage de canaux avec des files d'attente basées sur les priorités dans les réseaux radio cognitifs : stratégies et évaluation des performances. IEEETrans. Fil. Commun. 2014, 13, 630-645. [Référence croisée]
13. Esenogho, E. ; Srivastava, VM Deux stratégies d'assemblage de canaux hétérogènes dans les réseaux radio cognitifs : une performance Analyse. Int. J. Ing. Technologie. Innover. 2017, 7, 98-116.
14. Zhang, W. ; Soleil, Y. ; Deng, L. Allocation dynamique du spectre pour les réseaux radio cognitifs hétérogènes avec plusieurs canaux. Système IEEE. J. 2019, 13, 53-64. [Référence croisée]
15. Zhu, X. Analyse de l'accès cognitif au spectre radio avec réservation de canal optimale. Communique IEEE. Lett. 2007, 11, 304-306. [Référence croisée]
16. Esenogho, E. ; Mambou, EN Intégrer le régime de file d'attente dans les politiques d'agrégation cognitive des canaux de radio : une performance Évaluation. J.Commun. 2017, 1-5. [Référence croisée]
17. Esenogho, E. ; Srivastava, Stratégie d'assemblage de canaux VM dans les réseaux radio cognitifs : une approche basée sur les files d'attente. Int. J. Commun. Propagande d'antenne. IRCEAP 2017, 7, 31-47. [Référence croisée]
18. Xiao, X. ; Zeng, F. ; Hu, Z. Location de spectre adaptatif au flux dynamique avec agrégation de canaux dans les réseaux radio cognitifs. Capteurs 2020, 20, 3800. [CrossRef] [Pub Med]
19. El-Toukhy, AT ; Arslan, H. Améliorer les performances des SU de faible priorité à l'aide de canaux réservés dans CRN. Fil IEEE. Commun. Lett. 2020, 9, 513-517. [Référence croisée]
20. Bayrakdar, MOI ; Calhan, A. Améliorer l'utilisation du transfert de spectre pour les utilisateurs prioritaires de radio cognitive en exploitant Liaison de canaux avec atténuation de la famine. Int. J. Électron. Commun. 2017, 71, 181-191. [Référence croisée]
21. Suganthi, N. ; Meenakshi, S. Un algorithme de planification efficace utilisant un système de file d'attente pour minimiser le manque de temps non réel Utilisateurs secondaires du réseau radio cognitif. Groupe. Calculer. 2018, 25, 1–12. [Référence croisée]
22. Iftikhar, M. ; Mathkour, H. ; Imran, M. Un nouveau cadre pour le système de file d'attente G/M/1 basé sur un mécanisme de planification et d'interrogation pour analyser plusieurs classes de trafic auto-similaire et LRD. Fil. Réseau. 2016, 22, 1269-1284. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

23. Khan, M. ; Ahmad, J. ; Saddik, AE Drone-HAT : Transformateur d'attention hybride pour la reconnaissance d'actions complexes dans les vidéos de surveillance par drone. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur les ateliers de vision par ordinateur et de reconnaissance de formes (CVPR), Seattle, WA, États-Unis, 19-21 juin 2024 ; pages 4713 à 4722.
24. Taherkhani, N. ; Pierre, S. Priorisation et planification des messages pour le contrôle de la congestion dans les réseaux ad hoc de véhicules. Calculer. Réseau. 2016, 108, 15-28. [Référence croisée]
25. Han, W. ; Li, J. ; Tian, Z. Stratégies de détection dynamique pour une utilisation efficace du spectre dans les réseaux radio cognitifs. IEEETrans. Fil. Commun. 2011, 10, 3644-3655. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Routage multivoies basé sur l'apprentissage par renforcement profond pour LEO Réseaux de mégaconstellations

Chi Han [1], Wei Xiong [1,2,*] et Ronghuan Yu [1,2]

[1] Laboratoire national clé de sensibilisation aux cibles spatiales, Université d'ingénierie spatiale, Pékin 101400, Chine ; hanchi@hgd.edu.cn (CH); an1983@163.com (RY)
[2] School of Space Information, Space Engineering University, Pékin 101400, Chine *
Correspondance : xiongwei@hgd.edu.cn

Résumé : L'expansion des réseaux de mégaconstellations (MCN) représente une solution prometteuse pour atteindre une couverture Internet mondiale. Pour répondre à la demande croissante de services par satellite, le routage multivoie permet l'établissement simultané de plusieurs chemins de transmission, permettant la transmission de flux en parallèle. Néanmoins, la mobilité des satellites et les états de liaison variables dans le temps présentent un défi pour la découverte de chemins optimaux et la planification du trafic dans le routage multitrajet. Étant donné le manque de flexibilité des algorithmes de routage statiques traditionnels basés sur l'apprentissage par renforcement profond (DRL) pour traiter des topologies de constellation variables dans le temps, le routage multivoies basé sur DRL (DMR) activé par un réseau neuronal graphique (GNN) est proposé comme moyen d'améliorer la performances de transmission des MCN. DMR découple le problème d'optimisation stochastique du routage multivoie sous contraintes de trafic et de bande passante en deux sous-problèmes : la découverte du routage multivoie et la planification du trafic multivoie. Premièrement, l'algorithme de découverte de routes multi-chemins (MHMRD) basé sur le nombre minimum de sauts est proposé pour le calcul de plusieurs chemins disponibles entre tous les nœuds source et de Deuxièmement, le schéma de planification du trafic multivoies (GMTS) basé sur GNN est proposé comme moyen de planifier dynamiquement le trafic sur chaque chemin disponible pour chaque flux de données, sur la base des informations d'état des ISL et de la demande de trafic. Les résultats de la simulation démontrent que le schéma proposé peut être adapté à des constellations avec différentes configurations sans nécessité de formation répétée et améliore le débit, le taux d'achèvement et le délai de 42,64 %, 17,39 % et 3,66 % par rapport à l'algorithme du chemin le plus court en premier (SPF), respectivement.

Mots-clés : réseau satellite ; routage multivoie ; apprentissage par renforcement profond ; planification du trafic ; nombre de sauts

check for updates

Référence : Han, C. ; Xiong, W. ; Yu, R. Routage multivoies basé sur l'apprentissage par renforcement profond pour les réseaux de mégaconstellations LEO. Électronique 2024, 13, 3054. https:// doi.org/ 10.3390/electronics13153054

Rédacteur académique : Stefano Scanzio

Reçu : 12 juillet 2024
Révisé : 25 juillet 2024
Accepté : 31 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/ 4.0/).

1. Introduction

Les caractéristiques des réseaux mégaconstellations (MCN), telles qu'une couverture étendue , une faible latence et une bande passante élevée, leur confèrent des avantages uniques dans les communications dans les zones éloignées et les services sensibles aux délais (par exemple, communications d'urgence et surveillance des catastrophes) [1] . Les avantages susmentionnés ont entraîné le développement accéléré des MCN, qui devraient fournir une multitude de services, notamment les communications, la télédétection, la navigation et le positionnement. De plus, les MCN sont sur le point de devenir un élément essentiel de l'infrastructure du réseau intégré espace-air-sol (SAGIN) [2-4].

Afin de répondre à la demande croissante de services de communication par satellite, le routage multivoies constitue une approche prometteuse. Le routage multivoie permet d'établir simultanément plusieurs chemins de transmission entre les nœuds source et destination pour chaque flux de données, ce qui peut augmenter le débit du réseau [5]. Contrairement au routage à chemin unique, le routage à chemins multiples permet une utilisation optimale de la bande passante disponible, atténuant ainsi la congestion, améliorant le débit et améliorant la tolérance aux pannes. Ceci est réalisé en permettant à un seul service d'être transmis sur plusieurs chemins en parallèle. Par conséquent,

Machine Translated by Google

Le routage multivoie facilite la résilience des réseaux à satellite aux ressources limitées pour résister aux scénarios de défaillance de nœuds ou de liaisons. Cependant, la dynamique élevée des topologies des réseaux satellitaires et des états des liaisons de transmission présente des défis pour la découverte du routage multi-trajets et la planification du trafic multi-trajets [6-8].

La découverte du routage multi-trajets est le premier défi posé par la nature variable dans le temps de la topologie et du trafic des satellites. Des facteurs tels que les changements d'attitude du satellite et les environnements électromagnétiques complexes peuvent entraîner une diminution, voire une défaillance, des taux de transmission de la liaison laser. En conséquence, les pannes de liaison peuvent se produire fréquemment dans les MCN plutôt que de constituer un événement exceptionnel, comme dans les réseaux terrestres. L'apparition fréquente de réussites ou de pannes de liaison entrave la capacité du mécanisme de diffusion à découvrir et à maintenir les routes en temps opportun, comme c'est le cas dans les réseaux terrestres. Cela entraîne une augmentation des frais généraux associés à la diffusion et au contrôle de route. Par conséquent, les protocoles de routage ad hoc basés sur la topologie, tels que ADOV [9], sont sous-optimaux dans les MCN. De plus, en raison des contraintes de mobilité et d'énergie des satellites LEO, les liaisons établies ne sont souvent pas maintenues de manière stable. Les changements topologiques dans le processus de découverte de chemin peuvent entraîner l'expiration rapide des chemins découverts, les chemins correspondants n'existant plus au moment du transfert de données. Les facteurs ci-dessus nécessitent la découverte du routage multivoie pour pouvoir détecter les défaillances de liaison en temps opportun et définir raisonnablement plusieurs chemins alternatifs. Certains systèmes déploient actuellement le calcul de chemin dans le centre de contrôle du réseau au sol (NCC) [10]. Le NCC améliore les performances de transmission du réseau en prenant en compte de manière globale la répartition du trafic des utilisateurs terrestres et l'utilisation des liaisons et en exploitant pleinement la redondance des liaisons provoquée par la topologie maillée du réseau satellite pour planifier simultanément plusieurs chemins de transmission parallèles pour chaque flux.

La planification du trafic multivoies dans les MCN constitue le deuxième défi. Des environnements électromagnétiques complexes , des changements d'attitude des satellites et d'autres facteurs entraînent des fluctuations dans la qualité des liaisons. En conséquence, la planification traditionnelle du trafic multivoies basée sur le routage statique n'est plus applicable dans les MCN. En outre, la nature variable dans le temps du trafic des utilisateurs terrestres et la fluctuation de la qualité des liaisons rendent le réseau satellitaire incapable d' identifier avec précision les modèles de trafic, et la planification précise du trafic entre plusieurs chemins manque souvent d'informations efficaces. L'apprentissage par renforcement profond (DRL) a démontré des avantages significatifs dans la description des caractéristiques spatio-temporelles, les décisions de flux et d'autres domaines connexes. Un nombre considérable de chercheurs ont choisi d'adopter le DRL à des fins de planification adaptative des flux multi-trajets, comme en témoignent [11-14]. Cependant, les réseaux satellitaires variables dans le temps et la qualité fluctuante des liaisons inter-satellites (ISL) nécessitent l'agrégation de plusieurs tranches de temps pour la prise de décision dans les modèles utilisant le DRL. À mesure que la taille de la constellation augmente, la dimension du modèle augmente considérablement, ce qui entraîne une augmentation significative de l'effort de calcul et une réduction de l'évolutivité du modèle . Les réseaux de neurones graphes (GNN) sont capables d'identifier des caractéristiques et des modèles dans les données structurées par graphes, d'effectuer un raisonnement relationnel et une généralisation combinatoire sur des données structurées par graphes [15,16], et ils peuvent être appliqués sans réglage supplémentaire du modèle à des constellations de différentes topologies. et tailles [17,18].

Récemment, le DRL a démontré un potentiel considérable dans l'apprentissage des caractéristiques temporelles et spatiales du trafic dans le but de prendre des décisions d'itinéraire. Les chercheurs ont utilisé le DRL à des fins d'affectation adaptative du trafic, dans le but de remplacer la segmentation statique du trafic. Cependant, les modèles basés sur DRL nécessitent la capacité de résumer des instantanés topologiques continus afin de prendre des décisions dans un environnement satellitaire dynamique. Les réseaux satellitaires ont des espaces d'état de grande dimension et clairsemés, et la dimensionnalité des modèles DRL augmente considérablement avec la taille de la constellation et le niveau de demande de trafic, ce qui conduit à son tour à une mauvaise évolutivité du modèle. Les réseaux de neurones graphes (GNN) facilitent l'inférence de données relationnelles et la généralisation de structures combinatoires au sein d'informations structurées sous forme de graphes. Cela permet d'appliquer le modèle DRL à des constellations de satellites de différentes tailles sans nécessiter de modifications supplémentaires. À la lumière de l'analyse susmentionnée, nous proposons un routage multivoies (DMR) basé sur DRL et intégré par un GNN pour améliorer les performances d

Machine Translated by Google

Le problème du routage multi-trajets est initialement modélisé comme un problème d'optimisation stochastique, dans le but de maximiser l'efficacité du réseau sous des contraintes de trafic et de bande passante . Afin d'obtenir la solution optimale, le problème initial est découplé en deux sous-problèmes : la découverte du routage multi-trajets et la planification du trafic multi-trajets. En ce qui concerne le sous-problème initial, il est proposé que la topologie redondante du réseau à satellite soit pleinement exploitée, avec l'introduction d'un algorithme de découverte de routage multivoie basé sur le nombre minimum de sauts (MHMRD). MHMRD est conçu pour calculer un certain nombre de chemins disponibles entre tous les nœuds source et destination. Sur cette base, le deuxième sous-problème est résolu par la conception de la planification du trafic multivoies basée sur GNN (GMTS). GMTS modélise le processus de planification du trafic multivoies comme un processus de décision de Markov (MDP), qui planifie dynamiquement le trafic sur chaque chemin disponible pour chaque flux de données en fonction des informations sur l'état des liaisons du réseau satellite et de la demande de trafic. Les résultats de simulation sur Iridium et OneWeb démontrent que le schéma proposé ne repose pas sur un recyclage pour des constellations de différentes tailles. De plus, le débit du réseau, le délai moyen et le taux d'achèvement des flux ont dépassé ceux du schéma de base.

Les principales contributions de cet article sont résumées comme suit :

- Le problème du routage multi-trajets dans les réseaux satellitaires est modélisé comme un problème d'optimisation stochastique sous contraintes de trafic et de bande passante. L'objectif est de maximiser l'efficacité du réseau. Le problème est découplé en un sous-problème de découverte de routage multivoie et un sous-problème de planification de trafic multivoie. • Afin de résoudre le sous-problème de découverte du routage multivoie, l'algorithme MHMRD a été proposé comme moyen de planifier plusieurs chemins à nombre de sauts minimum pour chaque flux entre n'importe quelle paire de nœuds du réseau sur la base des informations sur l'état des liens. • Le sous-problème de planification du trafic multi-trajets est modélisé comme un MDP, avec le schéma GMTS proposé pour planifier dynamiquement la proportion de trafic sur chaque chemin disponible pour chaque flux de données. GMTS est une solution évolutive qui peut être appliquée à différentes constellations.

Le reste de ses papiers est organisé comme ceci. La section 2 fournit des travaux connexes. Dans la section 3, nous fournissons le modèle du système et la formulation du problème. Dans la section 4, le routage multivoies basé sur DRL est décrit. La section 5 fournit la simulation et les principaux résultats. Enfin, nous résumons les résultats dans la section 6.

2. Travaux connexes

2.1. Routage multi-trajets

Dans les réseaux satellite, il existe plusieurs chemins avec un nombre égal de sauts de bout en bout. Afin d'améliorer la fiabilité de la transmission des données et d'améliorer la capacité d'équilibrage de la charge du réseau, les chercheurs ont proposé l'utilisation du routage multivoies dans les réseaux satellitaires, où chaque flux est divisé en plusieurs sous-flux pour une transmission parallèle sur différents chemins. Afin de répartir le trafic sur plusieurs chemins, la méthode traditionnelle ECMP (Equal-Coût Multipath) effectue une répartition statique du trafic en fonction des informations du message.

Cependant, l'approche ECMP ne prend pas en compte les limitations des paramètres du réseau tels que la bande passante et le délai et est sujette à la congestion lorsque la charge du réseau est élevée.

Pour parvenir à une gestion dynamique des flux pour le routage multivoies, une architecture de réseau satellite basée sur un réseau défini par logiciel (SDN) a été proposée pour le contrôle central de la topologie et le contrôle du trafic [18-21]. Dans l'architecture réseau basée sur SDN, le plan de données et le plan de contrôle sont séparés, le contrôleur SDN détermine le routage en fonction des paramètres réseau et des exigences de QoS, et le satellite est responsable du transfert des données.

Dans [22], les auteurs ont tenté d'intégrer le codage réseau et le routage multivoies afin d'améliorer l'efficacité de la transmission de données des réseaux satellitaires. Cependant, l' approche de contrôle centralisé est sensible à des problèmes de latence élevés. Dans [23], afin de réduire la latence de contrôle et d'améliorer la stabilité de la transmission, les auteurs ont utilisé une approche distribuée pour le contrôle de routage. Dans [24], les auteurs ont proposé le routage coopératif multivoies basé sur le codage réseau (NCMCR). Afin d'optimiser la capacité de transport, chaque flux

Machine Translated by Google

dans NCMCR est transmis via plusieurs liaisons disjointes. Cependant, les schémas de routage multivoies mentionnés ci-dessus ne prennent pas en compte les paramètres de liaison des différents chemins de transmission et sont donc incapables d'effectuer de manière adaptative une répartition raisonnable du trafic. Dans [1], les auteurs ont conçu un schéma d'équilibrage adaptatif du trafic entre plusieurs chemins temporels en combinant des mécanismes de codage de réseau clairsemés et redondants. Cette approche permet d' obtenir des garanties de retard déterministes dans des ressources de nœuds limitées et des scénarios de concurrence multi-utilisateurs. Néanmoins, tous les schémas de routage mentionnés ci-dessus utilisent des topologies statiques, ce qui les empêche de s'adapter aux réseaux satellite dont les topologies changent dynamiquement.

2.2. Routage intelligent

L'environnement du réseau satellite variable dans le temps et les liaisons interstellaires dynamiques posent des défis au routage du réseau satellite. Afin de garantir la qualité de service du réseau dans des conditions de prolifération des utilisateurs et des tailles de constellations, le routage multivoies nécessite une planification de chemin plus efficace et des stratégies de contrôle du trafic plus fines. L'apprentissage par renforcement est un outil intelligent qui soutient la prise de décision en interagissant avec l' environnement [25-27], et les chercheurs ont proposé de nombreux schémas de routage intelligents basés sur l'apprentissage par renforcement. Dans [25], les auteurs ont développé un système d'apprentissage profond supervisé pour la construction de tables de routage. Dans [28], les auteurs ont utilisé l'apprentissage profond basé sur des graphes dans les réseaux satellites via une architecture de réseau neuronal appelée réseau neuronal de requête graphique. Néanmoins, de tels schémas de routage basés sur l'apprentissage supervisé sont limités par leur incapacité à généraliser et à s'adapter à différentes constellations. Pour résoudre ce problème, les auteurs de [29] ont proposé un modèle de processus de décision de Markov (MDP) pour le routage des réseaux satellites, utilisant l'apprentissage par renforcement profond (DRL) multi-agents pour satisfaire diverses exigences de qualité de service (QoS). Cependant, la politique d'objectif fixe rend les algorithmes de routage basés sur DRL peu flexibles, car ils sont incapables de s'adapter aux réseaux en évolution dynamique. Il est évident que les configurations d'objectifs statiques traditionnelles sont incapables de refléter l'importance variable des différentes métriques dans les environnements réseau dynamiques.
Afin de résoudre ce problème, les auteurs de [17,30] ont intégré un réseau neuronal graphique (GNN) dans les intelligences DRL, permettant l'ajustement en temps opportun des métriques de performances du réseau en prédisant la tendance des objectifs d'optimisation des algorithmes de routage. Cela permet aux intelligences d'apprendre des chemins optimaux capables de s'adapter aux différents changements environnementaux. Dans [31,32], les auteurs ont proposé différentes architectures DRL, qui ajustent toutes dynamiquement les poids des liens en fonction de la charge des nœuds clés ou de la charge des liens. Dans [33], les auteurs ont étendu les options TCP pour exploiter les informations de contrôle pertinentes et prendre en charge de manière flexible la communication entre les sous-flux de la couche transport et le contrôleur SDN. Une architecture MPTCP (scMPTCP) coopérée par SDN a été proposée, qui sélectionne les routes pour les nouveaux sous-flux en fonction de la bande passante disponible de chaque route.

et évite le goulot d'étranglement des autres flux secondaires. Il peut également s'adapter aux changements de charge du réseau. Dans [34], les auteurs ont proposé un contrôleur DQN considérant un modèle de perte de chemin basé sur le modèle de processus de décision de Markov pour la sélection de réseau et l'allocation adaptative de ressources dans des réseaux hétérogènes.

Néanmoins, un examen des recherches susmentionnées révèle que les études basées sur les DRL existantes ne sont pas facilement évolutives en raison de leur couplage inhérent aux états d'entrée et de leur topologie limitée, cohérente avec les données de formation. Pour résoudre la contradiction susmentionnée, le routage multivoies basé sur DRL proposé et intégré à un GNN peut facilement identifier l'action optimale dans un espace d'action continu. DMR découple le problème de routage multivoies en composants distincts (découverte multivoies et planification du trafic multivoies) afin de réduire la complexité de la solution. Parallèlement, la politique cible adoptée par DMR peut être modifiée en fonction des conditions environnementales dominantes, améliorant ainsi la flexibilité du système par rapport à différentes topologies.

Machine Translated by Google

3. Modèle de système et formulation du problème 3.1.

Scénario de trajets multiples

Le scénario de routage de trajets multiples dans le MCN est illustré à la figure 1, où le réseau à satellite est divisé en plans de données et plans de contrôle mutuellement indépendants via le SDN.
Dans le réseau terrestre, les données du tampon d'envoi sont transmises à l'expéditeur via des routeurs sur plusieurs sauts et regroupées en plusieurs sous-flux. Chaque sous-flux peut sélectionner le chemin de transmission optimal en fonction de l'état actuel du réseau, puis converger vers le récepteur.

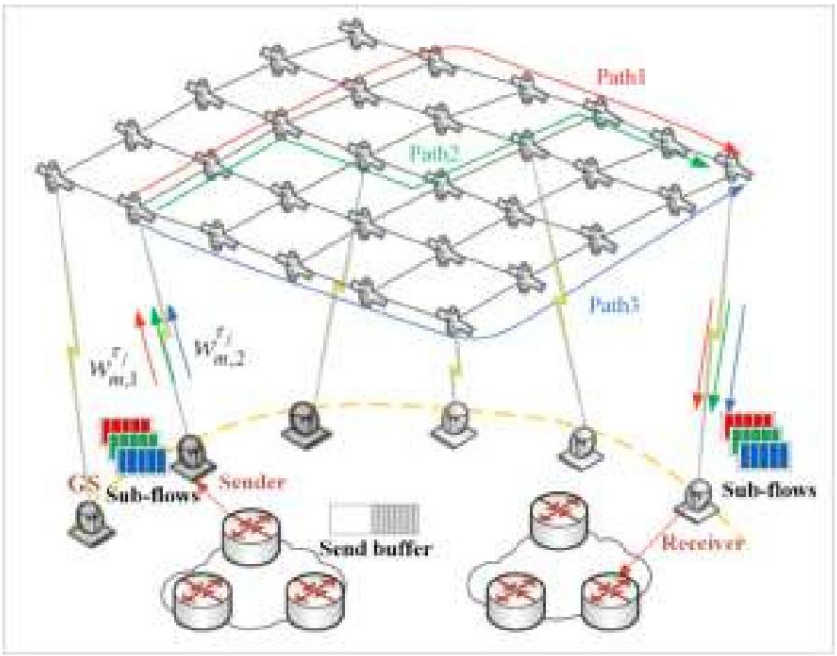


Figure 1. Routage multivoies dans le réseau mégaconstellation.

Le plan de données comprend la constellation Walker Delta NSNP/NP/F, répartie de manière uniforme et symétrique, et la station au sol. Les plans orbitaux NP sont répartis uniformément le long de l'équateur, tandis que les satellites NS sont répartis uniformément sur chaque plan. Chaque satellite est capable d'être connecté à quatre liaisons inter-satellites (ISL), comprenant deux ISL intra-plan et deux ISL inter-plan. Dans le plan de contrôle, le centre de contrôle du réseau assume les fonctions de gestion unifiée de la topologie, de planification du trafic et de contrôle des chemins. En raison de la mobilité des réseaux de mégaconstellations LEO, les ISL inter-plans sont sujets à de fréquentes perturbations et reconstructions, et la topologie est en constante évolution. Par conséquent, le NCC doit être continuellement mis à jour pour s'adapter à la topologie en évolution, ce qui présente un défi important pour la planification des itinéraires multivoies et la planification du trafic.

3.2. Modèle de routage et de trafic à trajets multiples

Le MCN est modélisé comme un graphe spatio-temporel G = {(V, E, T, N)}, où V = S G est le nœud constitué de tous les satellites et passerelles terrestres et E = ES EG est l'ensemble des ISL ES et l'ensemble des liaisons terrestres EG, tandis que T est le vecteur de créneau temporel d'une longueur N. Comme illustré sur la figure 1, la topologie maillée du MCN permet l'existence de plusieurs routes potentielles entre n'importe quelle paire de nœuds donnée. Supposons que le nombre de flux de paquets à l'intervalle de temps t soit M (c'est-à-dire Pt = { (si , di)|i = 1, 2, · · ·, M}). En d'autres termes, la variable M représente le nombre de sous-flux, comme le montre la figure 1, où trois sous-flux de l'expéditeur attendent d'être transmis via plusieurs chemins. Le nombre de chemins disponibles entre le

Le nœud source si et le nœud de destination di sont Lsi ,di , noté Rt = p t tt · · ·, p · · ·, p 1,1, 1,L , M,L .

Ici, p m, l t est le lième chemin entre la mième paire de nœuds source et de destination, constitué

Machine Translated by Google

de tous les ISL sur ce chemin (c'est-à-dire, $p^t = \varepsilon 1, \varepsilon 2, \cdots, \varepsilon j, \cdots, \varepsilon nm,l$, où nm,l est le saut total = m,l nombre du lien actuel).

Soit $q^t_{\varepsilon j}$ soit le délai d'attente du lien εj, t le délai de traitement des paquets, et γ soit $r_{\varepsilon i, \varepsilon j}$ la distance de liaison. Ensuite, le retard du lième chemin de transmission de la même paire de nœuds source-destination peut être exprimé comme suit :

$$\eta^t_{m,x} = \sum_{j=1}^{nm,x} t_{t + r + q_{\varepsilon j} \varepsilon j} \frac{t_{\gamma \varepsilon j}}{c} \quad (1)$$

où c est la vitesse du vide de la lumière et nm,l désigne le nombre de sauts de la liaison actuelle.

Chaque nœud source peut diviser le trafic en sous-flux Lsi ,di pour passer par les chemins Lsi ,di en parallèle. Soit ωt le taux de trafic de chaque sous-flux. Ensuite, la somme de Lsi ,di entre n'importe quelle paire de nœuds source et destination doit être $_{nm,l}$ flux secondaires égale à un, ce qui peut être exprimé comme suit :

$$\sum_{l=1}^{L} {}^t\omega_{m,l} = 1, \quad m = 1, 2, \cdots, \quad M. \quad (2)$$

Par conséquent, le trafic du lien εj à l'instant t peut être exprimé par

$$f^t_{\varepsilon j} = \sum_{m=1}^{M.} \sum_{l=1}^{L} {}^{tt}{}_{m,l} b \, \delta_{m,l} {}^{t}\omega \quad (3)$$

où b^t_m est la demande de bande passante de la mième paire vers les nœuds source et de destination et $\delta^t_{m,l}$ est le taux de perte de paquets sur le chemin. Sachant que la bande passante maximale de la liaison interstellaire est BW, le trafic ISL ne doit pas dépasser la limite maximale de bande passante, qui peut être exprimée comme suit :

$$f^t_{\varepsilon j} \leq PC, \quad \varepsilon j \quad p^t_{m,l} \quad (4)$$

Par conséquent, le débit entre la mième paire de nœuds peut être exprimé par

$$f^t = \max f^t_{m,l} \varepsilon j, \quad \varepsilon j \quad p^t_{m,l} \quad (5)$$

3.3. Formulation du problème

Afin de mesurer le délai et le débit des ISL, la fonction utilitaire du MCN est défini comme

$$U \left(\bar{ft}, \bar{dt} \right) = \beta 1 \log \bar{ft} - \beta 2 \log \bar{dt} \quad (6)$$

où β1 et β2 sont les coefficients d'importance du débit et du retard, respectivement, ft et $\bar{dt}$ sont le débit et le retard moyens de β1 et β2 satisfaisant β1 + β2 = 1, et la tranche horaire actuelle, respectivement, qui peuvent être exprimés comme suit :

$$\bar{pi} = \sum_{m=1}^{M.} \sum_{l=1}^{|fm|} \sum_{y=1}^{|pk|} \frac{pak}{t}, \quad t \quad [1, T] \quad (7)$$

$$\bar{dt} = \frac{\sum_{l=1}^{M.} \sum_{y=1}^{|fm|} {}^t_{[1,} \sum \sum_{m=1}^{|pk|} {}^{d\,t}_{m,l} \kappa y}{\sum_{m=1}^{M.} \sum_{y=1}^{T] \, |fm| \, |pk|} \kappa y} \quad (8)$$

où | fm| est le nombre de flux de données entre la mième paire de nœuds, |pk | est le nombre de paquets pour le kème flux de données, pak est la taille du paquet et κy {0, 1} est une variable binaire qui mesure si le yème paquet a été envoyé avec succès.

Machine Translated by Google

Par conséquent, l'optimisation du routage multitrajet du réseau satellite peut s'exprimer comme le problème d'optimisation suivant :

$$
\begin{aligned}
&P0 : \max U\left(f, \bar{d}, t\right) \quad t \in [1, T] \\
&C1 : \bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{je=1}^{N} \bar{d}_{dt} \\
&C2 : f = \frac{1}{N} \sum_{je=1}^{N} pi \\
&\text{st } C3 : f_{\varepsilon j}^{t} \le PC, \quad \varepsilon j \in p \quad m, l \\
&C4 : \sum_{l=1} \varphi_{m,l}^{t} = 1, \quad m \in [1, M] \\
&C5 : d_{m,l}^{t} \le d_{mon}, \quad 1 \le l \le y \le L, \quad m \in [1, M]
\end{aligned}
\tag{9}
$$

où les contraintes C1 et C2 désignent respectivement le délai et le débit moyens du réseau satellite, la contrainte C3 stipule que le débit de la liaison εj à un instant donné t ne peut pas dépasser la limite de bande passante, la contrainte C4 indique que la communication totale entre toute paire de Les nœuds sont le résultat cumulé de plusieurs sous-flux traversant plusieurs chemins, et enfin, la contrainte C5 décrit les contraintes de retard de tous les chemins candidats entre chaque paire de nœuds. On peut voir que P0 est un problème NP-difficile avec un espace de solution robuste. P0 se compose de deux parties : la découverte du routage multi-trajets et la planification du trafic multi-trajets - qui convergent lentement et peuvent tomber dans des optima locaux si elles sont résolues par une optimisation stochastique. Afin de réduire la complexité de la solution, cet article divise le problème en deux sous-problèmes, la découverte du routage et la planification du trafic, afin d'améliorer l'efficacité de l'algorithme.

4. Routage multivoies basé sur DRL Dans

cet article, nous proposons un routage multivoies basé sur DRL (DMR), comme le montre la figure 2, qui utilise d'abord l'algorithme de découverte de trajets multiples basé sur le nombre minimum de sauts pour résoudre plusieurs chemins avec des délais acceptables, puis utilise l'algorithme GMTS pour déterminer le schéma de planification du trafic en fonction de l'état du réseau de constellation.

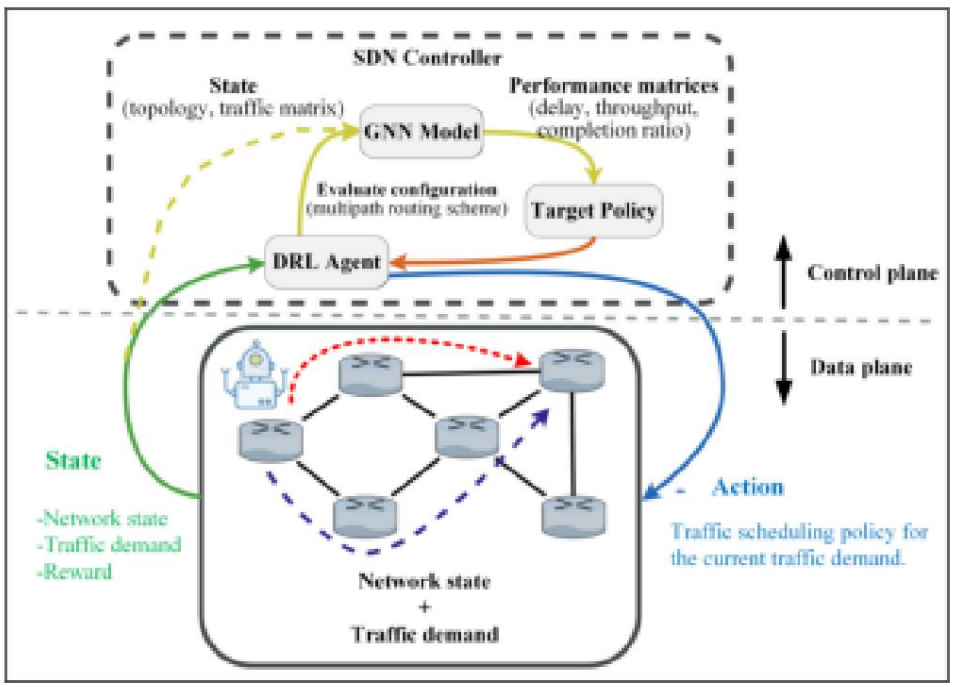


Figure 2. La structure globale du routage multivoie basé sur DRL.

Machine Translated by Google

4.1. Découverte du routage multivoie

L'objectif du sous-problème de découverte de routage multi-trajets est d'identifier le chemin de retard optimal et le chemin de retard sous-optimal. Dans les MCN, le délai de propagation, qui dépend du nombre de sauts de chemin, représente une composante importante du délai de bout en bout . Par conséquent, les chemins à trajets multiples sont principalement pris en compte pour les chemins à sauts optimaux et sous-optimaux au sein du réseau. Le sous-problème de découverte de routage multivoie peut être exprimé comme suit :

$$\begin{array}{l} P1 : \min d\,t_{m,l}, \quad t \quad T, m \quad [1, M], l \quad [1, L] \\ st\ d\,t \le d\,t_{m,l} \quad _{mon}, \quad 1 \le l \le y \le L \end{array} \tag{dix}$$

Le chemin du nombre de sauts minimum entre n'importe quelle paire de nœuds est initialement déterminé. Sur cette base, le NCC détermine le chemin de transmission sous-optimal (c'est-à-dire le chemin de secours) pour chaque flux par ordre décroissant de trafic. En effet, le trafic centralisé est plus susceptible de provoquer une congestion des liaisons que le petit trafic décentralisé. Dans la constellation du delta de Wakler NSNP/NP/F, comme le montre la figure 3, l'inclinaison est α et la différence d'ascension droite du nœud ascendant (RAAN) des orbites adjacentes est ΔΩ = 2π/NP. La différence de phase entre les satellites voisins sur la même orbite est ΔΦ = 2π/NS, tandis que la différence de phase entre les satellites voisins sur des orbites adjacentes est Δu = 2πF/NSNP, tandis que u1 et u2 sont l'argument de latitude (ou angle de phase) valeurs des satellites source et destination, respectivement. L'argument de latitude est l'angle entre le nœud ascendant et le satellite et définit essentiellement la position du satellite sur l'orbite, où ζ(u1) et ζ(u2) indiquent la différence de longitude du satellite source et de destination par rapport au satellite ascendant correspondant. nœuds, respectivement. Dans la constellation Walker Delta, le nombre de sauts de bout en bout comprend à la fois les sauts transversaux inter-plans Hh et les sauts intra-plan Hv.

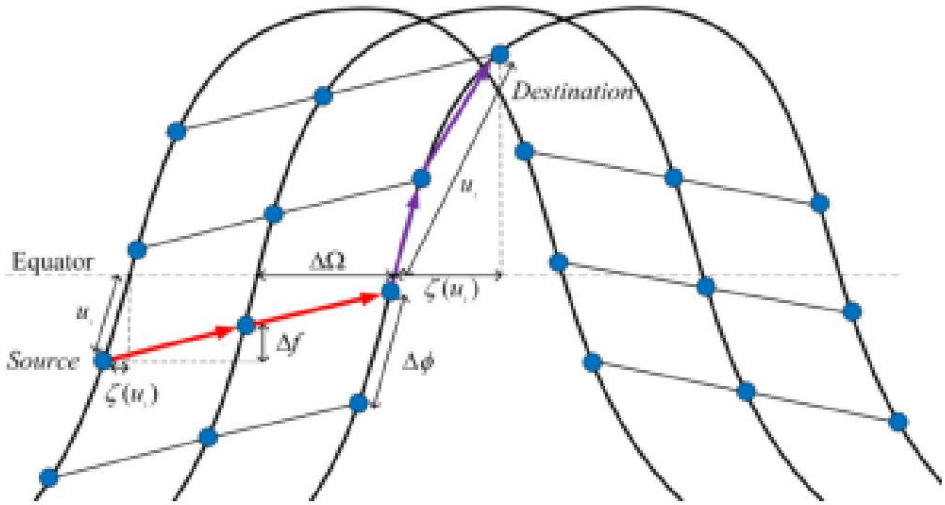


Figure 3. Trace du point sous-satellite des réseaux de mégaconstellations.

4.1.1. Sauts inter-plans Hh Le nombre

de sauts inter-plans dépend de la différence RAAN ΔY0 des orbites où se trouvent les nœuds source et destination. Étant donné une paire de satellites source et destination (s, d), ΔY0 est calculé comme suit :

$$\Delta Y0 = (Y2 - Y1) \bmod 2\pi \quad [0, 2\pi] \tag{11}$$

où Y1 et Y2 sont respectivement les valeurs RAAN de s et d. Si le satellite de destination est à l'ouest du satellite source, alors la différence RAAN est de 2π − ΔY0. Depuis le RAAN

Machine Translated by Google

La différence entre les orbites adjacentes est constante (c'est-à-dire $\Delta\Omega = 2\pi/NP$), les sauts inter-plans dans les directions ouest et est peuvent être exprimés comme suit :

$$H_h^{\leftarrow} = \frac{2\pi - \Delta Y0}{\Delta\Omega} \quad (12)$$

$$H_h^{\rightarrow} = \frac{\Delta Y0}{\Delta\Omega} \quad (13)$$

où $\lfloor x \rceil = \mathrm{sgn}(x) \lfloor x + 1/2 \rfloor$ désigne l'entier le plus proche de x, $H_h^{\leftarrow}$ est le nombre de sauts entre les plans orbitaux à l'ouest et $H_h^{\rightarrow}$ est le nombre de sauts inter-plans vers l'est.

4.1.2. Sauts intra-plan Hv Les

sauts intra-plan dépendent de la différence d'angle de phase Δu du satellite. Chaque saut intra-plan augmente l'angle de phase de $\Delta\Phi$, et chaque saut inter-plan entraîne un incrément d'angle de phase de Δf . Par conséquent, l'angle de phase du satellite de destination peut être exprimé comme suit :

$$u2 = u1 + \Delta f \cdot H_h^{\rightarrow} + \frac{\Delta\Phi}{\Delta u} \cdot H_v \quad (14)$$

où H est le nombre de sauts intra-plan vers l'est. Afin de calculer Hv, il faut d'abord éliminer la différence de phase $\Delta f \cdot H_h^{\rightarrow}$ provoquée par Hh de la différence de phase $\Delta u = u2 - u1$, où u1 et u2 sont l'argument des valeurs de latitude des satellites source et de destination. , respectivement. Pour distinguer la différence de phase due à la propagation vers l'est et vers l'ouest, Δu peut être exprimé séparément comme suit :

$$\Delta u = (u2 - u1 - H_h^{\rightarrow} \cdot \Delta f) \bmod 2\pi \quad (15)$$

$$\Delta u^{\leftarrow} = (u2 - u1 + H_h^{\leftarrow} \cdot \Delta f) \bmod 2\pi \quad (16)$$

où Δf est le changement d'angle de phase dû aux sauts inter-plans. Comme l'illustre la figure 3, la trace du point sous-satellite est divisée en un segment ascendant (du sud-ouest au nord-est) et un segment descendant (du nord-ouest au sud-est), permettant la propagation des données dans les deux sens. Par conséquent, dans cet article, les sauts intra-plan dans les quatre directions sont calculés, ce qui peut être exprimé comme suit :

$$H_v = \frac{\Delta u^{\leftarrow}}{\Delta\Phi} \quad (17)$$

$$H_v = \frac{\Delta u}{\Delta\Phi} \quad (18)$$

$$H_v = \frac{2\pi - \Delta u^{\leftarrow}}{\Delta\Phi} \quad (19)$$

$$H_v = \frac{2\pi - \Delta u}{\Delta\Phi} \quad (20)$$

où $\Delta u^{\leftarrow}$ et Δu désignent la différence de phase due à la propagation vers l'ouest et l'est et H_v désigne la différence de phase entre orbites adjacentes, respectivement. Pendant ce temps, la H_v, H_v, H_v, H_v différence de phase H est due aux sauts dans l'orbite vers le nord-ouest, le nord-est, le sud-ouest et le sud-est, respectivement.

Machine Translated by Google

Les sauts inter-plans Hh et les sauts intra-plans Hv ont été calculés précédemment. Par conséquent, le nombre minimum de sauts de bout en bout dans la constellation en orbite inclinée peut être exprimé comme suit :

$$H = \min \begin{matrix} H_{\overleftarrow{h}} + H_v \\ H_{\overleftarrow{h}} + H_v \\ H_{\overrightarrow{h}} + H_v \\ H_{\overrightarrow{h}} + H_v \end{matrix} \quad (21)$$

Sur la base de l'obtention du chemin de nombre de sauts le plus court, plusieurs chemins disponibles sont généré. En prenant le calcul de chemin sous-optimal entre les paires de nœuds (s, d) comme un exemple, dans un premier temps, la fréquence d'occupation $F^t_{un\ B}$ de chaque lien et le nombre minimum de sauts ensemble de chemins $R^t_{un\ B}$ sont calculés. Pendant ce temps, le seuil de fréquence d'occupation de la liaison ξε est défini. Le poids $mt_{un\ B}$ [r1,r2] du lien (a, b) est défini si $F^t_{a,\ b\ a,b} \leq \xi\varepsilon$; sinon, mt [r2,r3], où r1 < r2 < r3 sont des nombres aléatoires. Afin d'empêcher l'interconnexion de chemins disparates, le NCC éliminera les liens dans $R^t_{un\ B}$ du réseau. Ensuite, le NCC identifiera les chemins réalisables optimaux pour (s, d) parmi les liens restants, en utilisant le principe du nombre de sauts de bout en bout le plus court. Le processus mentionné ci-dessus est répété en continu jusqu'à ce que L chemins possibles entre deux nœuds quelconques du réseau a été identifié. Le processus spécifique du MHMRD est illustré dans l'algorithme 1. Le

La complexité de calcul de l'algorithme 1 est O (N log N).

Algorithme 1 : Découverte de routes multivoies basée sur le nombre minimum de sauts (MHMRD).

Entrée : {(V, E, T, N)}, paire de nœuds source-destination P
Résultat : Parcours des candidats R

```
Initialisation : R =
pour i = 1 : N faire
    Calculer le chemin du nombre minimum de sauts R^t via l'équation (21) ;
    Calculez les autres chemins disponibles ;
    pour (s, d) dans P faire
        pour l = 1 : L − 1 faire
            Calculer la fréquence d'occupation F^t_unB de chaque ISL ;
            pour (a, b) dans R^(ne faits pas)
                F^t_unB ← F^t_unB + 1 ;
            fin
            pour (a, b) dans E^t faire
                si F^t ≤ ξε alors
                    mt_(a,b unB) [r1,r2];
                fin
                si F^t > ξε alors
                    mt_(a,b unB) [r2,r3];
                fin
            fin
            pour e dans R^t faire
                Supprimez le bord de E^t;
            fin
            Calculez les chemins réalisables R via le chemin du nombre de sauts minimum ;
        fin
    fin
fin
```

Machine Translated by Google

4.2. Planification du trafic à trajets multiples

Sur la base de l'achèvement de la découverte des chemins multivoies, le deuxième sous-problème du routage multivoies pour les MCN est la planification du trafic multivoies, qui peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} P2: \max\ & U\left(f_L, \bar{d}, t \in T\right) \\ St\ & \sum_{l=1}^{|\omega_t|} f_l M_{m,l} = 1, \cdots, \\ & f_{\varepsilon j} \le PC, \quad \varepsilon j \in p_{m,l}^t \end{aligned} \tag{22}$$

Étant donné que la décision d'affectation du trafic dans les réseaux à satellite dépend de l'état actuel du nœud et des nœuds environnants dans le réseau, indépendamment de l'état historique, le sous-problème de planification du trafic multi-trajets peut être décrit comme un processus de décision de Markov (MDP). L'apparition de pannes dans les ISL ou les nœuds a pour effet de détériorer la fonctionnalité du réseau satellitaire, entraînant de fréquentes modifications de la topologie du réseau. Étant donné que le GNN a une capacité de généralisation supérieure pour des topologies de différentes tailles, cet article propose l'adoption de la planification du trafic multivoies (GMTS) basée sur le GNN, comme illustré dans la figure 4. L'agent DRL utilise un algorithme d'optimisation de politique proximale (PPO). qui est un algorithme acteur-critique. À chaque étape du MDP, le modèle d'acteur sélectionne une décision de planification du trafic et le modèle critique attribue un score à cette décision en fonction du retour de récompense environnementale. Le processus est répété en continu, dans le but d'optimiser la tâche de planification des flux afin de maximiser la récompense cumulée.

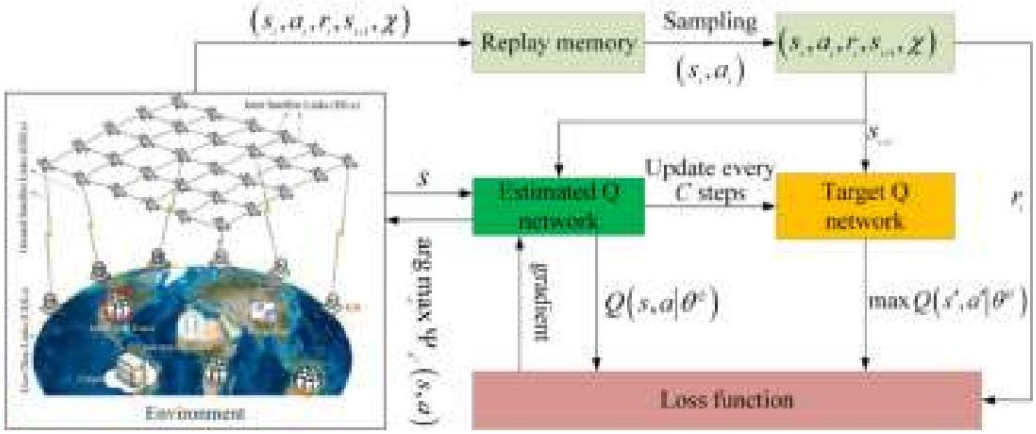


Figure 4. Le cadre de l'algorithme de planification du trafic multivoies (GMTS) proposé basé sur GNN.

4.2.1. État

En divisant le temps en plusieurs intervalles de temps, la matrice de demande de trafic dans chaque intervalle de temps peut être notée TR = [b1, b2, · · ·, bM], où bi désigne la bande passante entre la ième paire de nœuds. D'après l'équation (5), le débit du jème lien est fj .
Par conséquent, la bande passante résiduelle de la ième liaison, notée ci , peut être exprimée en termes de bande passante de liaison BW :

$$ci = BW - fi, \quad je \in [1, L] \tag{23}$$

Étant donné que le nombre maximum de sauts entre paires de nœuds est Hmax, le jème chemin entre la ième paire de nœuds peut être désigné par pi,j = {e1,e2, · · ·,eHmax }, et la matrice de chemin correspondante peut être désigné par Pt = [p1,1, · · ·, p1,L, · · ·, pM,L]. Par conséquent, le vecteur d'état à l'intervalle de temps t peut être exprimé comme suit :

$$st = [Ct, TRt, Gt, Pt], \quad st \in S \tag{24}$$

où S est l'espace d'état du réseau satellite.

Machine Translated by Google

4.2.2. Action

Sur la base des informations contenues dans l'espace d'état, NCC divise le trafic réseau entre chaque paire de nœuds en L chemins candidats qui sont précalculés. L'action est donc définie comme un vecteur at constitué par la proportion de trafic sur les chemins candidats, qui peut s'exprimer comme suit :

$$\text{ttt à} = \omega \cdot \cdot \cdot, \omega \cdot \cdot \cdot, \omega\ 1,1, \quad 1,L\ , \qquad M,L \tag{25}$$

où la proportion de débit sur chaque chemin doit satisfaire à l'équation (2).

4.2.3. Récompense

Après avoir exécuté l'action dans l'état st au temps t, l'agent recevra un retour pour évaluer l'efficacité de l'action. Dans la planification du trafic multi-trajets, la récompense est la fonction objective du sous-problème P2, qui peut s'exprimer comme suit :

$$t = \sum_{m=1}^{M.} \sum_{l=1}^{L} U \quad {}^{-}_{fm,l}\ ,\ {}^{-}dm,l \tag{26}$$

où $^{-}_{fm,l}$ est le débit moyen sur le lième chemin entre la mième paire de nœuds et $^{-}dm,l$ est le délai moyen sur le lième chemin entre la mième paire de nœuds. L'agent cherchera à compléter la planification du trafic multivoie avec un débit plus élevé et une latence plus faible.

Puisque la prise de décision est divisée en plusieurs phases, la récompense cumulée Rt , basée sur une seule récompense momentanée définie, peut être exprimée comme suit :

$$Rt = \sum_{k=0}^{\infty} k\ \rho\ rt+k+1 \tag{27}$$

où ρ [0, 1] est le facteur d'actualisation. Étant donné qu'il existe plusieurs actions possibles dans chaque état, le gain moyen pour chaque état et le gain moyen pour chaque action d'état peuvent être exprimés comme suit :

$$\Gamma\mu(s) = E\mu(\ Gt|st = s) \tag{28}$$

$$\Psi\mu(s, a) = E\mu(\ Gt|st = s, at = a) \tag{29}$$

Ici, Ψμ(s, a) est maximisé lorsque l'agent du DRL trouve la politique optimale μ^{*}, convertissant le processus de mise à jour de Ψμ(s, a) avec le nombre d'itérations sous la forme Bellman ; en d'autres termes, nous avons

$$\Psi\mu(s, a) = E\mu\ rt + \rho\Psi\mu(st+1, at+1)\ st = s, at = a \tag{30}$$

Après que le DRL converge vers un niveau stable, l'action optimale correspondante aμ peut être exprimée comme suit :

$$a\mu = \arg\max_{un} \Psi\mu\ (s, a) \tag{31}$$

4.3. Processus de formation de GMTS

Le pseudo-code du processus de formation GMTS est présenté dans l'algorithme 2 avec la complexité informatique de O(L). L'initialisation de μ(s|θ μ) et Q s, a|θ Q est d'abord requise, où θ μ et θ Q sont des hyperparamètres du réseau d'acteurs et du réseau critique, respectivement. Pendant la phase de formation, le tampon de relecture d'expérience est utilisé pour stocker les données d'interaction environnementale , notamment les états, les actions et les récompenses. Afin d'éviter le surajustement, les échantillons générés (st , at ,rt ,st+1, χ) sont stockés dans le tampon de relecture d'expérience à chaque étape de décision. À ce stade, χ {0, 1} est utilisé pour déterminer si la formation du modèle est terminée dans la phase en cours. L'échantillon (si , ai ,ri ,si+1 , χ) sera extrait à des intervalles spécifiés dans

Machine Translated by Google

conformément au seuil de tampon de lecture Bmax dans le but d'entraîner le réseau.
À ce stade, la valeur Q cible peut être exprimée comme suit :

$$Q\ yi = ri + \rho(1 - \chi)\ Q\ si+1\ ,\ ai+1|\theta \tag{32}$$

Algorithme 2 : processus de formation de la planification du trafic multivoies basée sur GNN (GMTS).

Entrée : Bmax, réseau critique, réseau d'acteurs et réseau cible Sortie : aμ 1
pour i = 1 : L
do Réinitialiser l'état
initial comme s0 pour t = 1 : T do
Calculer l'action
à , la récompense rt et le nouvel état st +1 Stocker (st , at ,rt ,st+1,
χ) dans le tampon de relecture Mettre à jour l'état st
à st+1 while |B| ≤ Bmax do pour j = 1 : NB do Calculer
pi selon l'équation
(34)
Calculer ωi selon l'équation (36)
Calculer la valeur Q cible yi selon l'équation (32)
Mettre à jour la probabilité de transition d'échantillonnage selon la fin de
l'équation (35)
fin
Calculer la perte du réseau critique et du réseau d'acteurs selon les équations (38) et (39)
Mettez à jour les paramètres du réseau d'acteurs et du réseau critique en fonction de
l'approche descendante du gradient. 16
fin
17 fin

Dans l'algorithme GMTS, l'erreur de différence temporelle (erreur TD) est utilisée comme moyen d'évaluer l'importance des transitions. L'erreur TD entre la valeur Q cible et la valeur Q actuelle peut être exprimée comme suit :

$$Q\ \delta i = yi - Q\ si\ ,\ ai\ |\theta \tag{33}$$

La priorité proportionnelle correspondante est

$$pi = \delta i + \eta \tag{34}$$

où η désigne une quantité extrêmement petite et η est ajouté afin que les échantillons puissent être échantillonnés même lorsque l'erreur TD est nulle. La méthode d'échantillonnage stochastique est adoptée et la probabilité de transition d'échantillonnage i est

$$P(i\ ) = \frac{p_{je}^{\alpha}}{\sum k p_k^{\alpha}} \tag{35}$$

où α détermine le degré de priorisation utilisé. Lorsque α = 0, alors la méthode d'échantillonnage est dégradée en échantillonnage aléatoire. Les poids de l'échantillon d'importance (IS) de (si , ai ,ri ,si+1 , χ) sont

$$\omega i = \left(\frac{Pi)}{Pmin}\right)^{\beta} \tag{36}$$

Machine Translated by Google

où β est utilisé pour un contrôle biaisé et impartial. Étant donné le taux d'apprentissage Q, le réseau d'acteurs θ Q peut être mis à jour de la manière suivante :

$$\theta Q \leftarrow \theta Q + \quad Q\delta i \quad \theta Q \, Q \, s, a|\theta^{Q} \tag{37}$$

Par conséquent, la fonction de perte du réseau critique et du réseau d'acteurs peut être exprimée comme suit :

$$Lq = \frac{1}{N.-B.} \sum_{je=1}^{Bmax} \omega i \delta \, je^{2} \tag{38}$$

$$L\mu = -Q \, s, a|\theta^{Q} \tag{39}$$

où NB est la taille du tampon de relecture B.

4.4. Flux de travail du

DMR Le routage multivoies basé sur DRL (DMR) proposé dans cet article peut être divisé en deux phases, la découverte de chemins multiples basée sur le nombre minimum de sauts (MHMRD) et la planification du trafic multivoies basée sur GNN (GMTS), comme le montre la figure 5. Dans la première étape, le centre de contrôle du réseau planifie d'abord plusieurs chemins optimaux entre des paires de nœuds arbitraires sur la base du principe du nombre minimum de sauts en fonction de la topologie du réseau. Plus précisément, sur la base de la périodicité et de la prévisibilité des orbites des satellites, le réseau est divisé en plusieurs tranches de temps en fonction d'intervalles de tranches de temps, et la topologie du réseau reste stable dans chaque tranche de temps discrète. Dans chaque intervalle de temps, le MHMRD calcule L chemins disponibles au nombre minimum de sauts pour chaque service en fonction de l'ordre de priorité défini par le MHMRD en fonction du volume de service de bout en bout. Après avoir terminé le calcul pour la plage horaire actuelle, il passe à la plage horaire suivante. Dans la deuxième phase, le centre de contrôle du réseau génère les ratios de répartition pour chaque service sur différents chemins sur la base du modèle obtenu à partir de la formation GMTS et les envoie aux satellites correspondants au moment approprié avant le début de chaque créneau horaire.

D'une part, cet article adopte la relecture prioritaire de l'expérience pour accélérer la convergence du modèle en échantillonnant les échantillons dans le pool de relecture d'expérience selon une certaine priorité. D'un autre côté, en raison de la nature dynamique des réseaux satellitaires, la topologie du réseau et les matrices de trafic varient dans le temps, et les DNN traditionnels ne peuvent pas gérer efficacement ces entrées changeantes. Par conséquent, dans cet article, nous adoptons GNN pour les structures de graphes de taille variable et les configurations de routes en conséquence. Étant donné que les GNN ont de meilleures capacités de généralisation pour les structures de réseau dynamiques à différentes échelles, ils peuvent être utilisés pour agréger des fonctionnalités élémentaires sans spécifier les dimensions d'entrée.

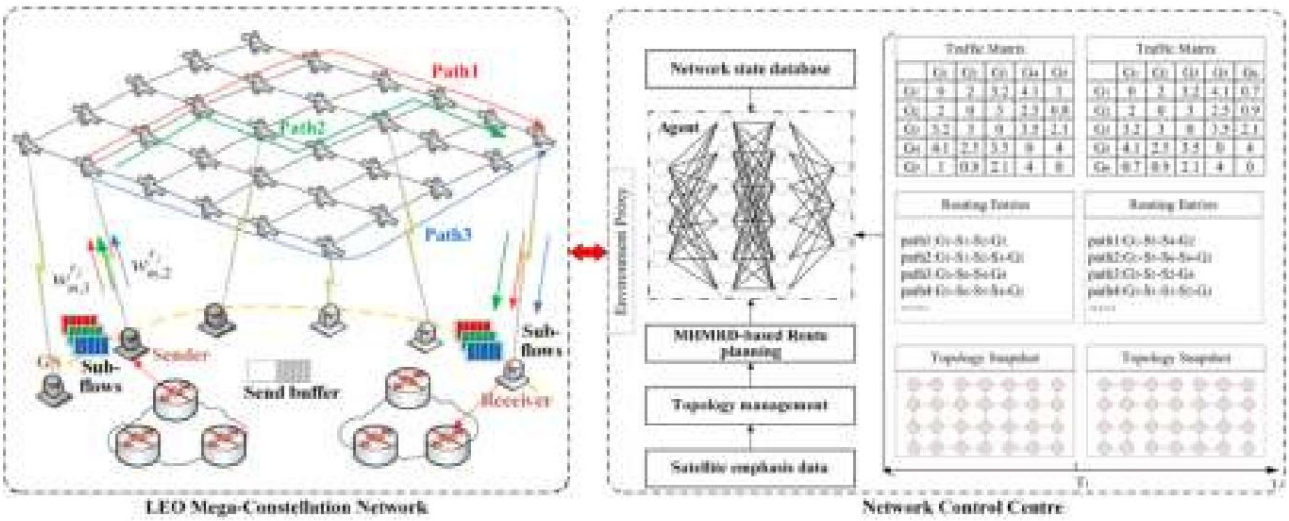


Figure 5. Routage multivoies basé sur DRL pour les réseaux de mégaconstellation LEO.

Machine Translated by Google

5. Évaluation des performances

5.1. Configuration de la simulation

Dans cet article, nous implémentons le calcul de routage et la planification du trafic multivoies pour Mégaconstellations LEO dans NS3 pour analyser les performances de l'algorithme DMR proposé. Afin d'analyser l'évolutivité du routage multivoies sur différentes constellations, ce Le papier effectue des tests sur deux constellations de tailles différentes. La première constellation était la constellation Iridium [35] avec 66 satellites en orbite polaire, et le second était le Constellation OneWeb [36] avec 648 satellites, qui contient un total de 18 plans orbitaux avec 36 satellites répartis uniformément sur chaque plan orbital. Les paramètres des deux Les constellations sont présentées dans le tableau 1. Afin de valider les performances des trajets multiples routage sous différentes tailles de demande de trafic, un ensemble de données de trafic a été généré sur la base de la densité du trafic terrestre, où le nombre de paires de nœuds source-destination était de 50. L'algorithme GMTS proposé a été implémenté sur la base de Python 3.9 et Pytorch 1.14, et les paramètres correspondants sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 1. Paramètres de la constellation.

Constellation	NP	N.-É.	NG	ε	h	E
Iridium	6	11	16	90◦	780 km	20◦
UnWeb	18	36	16	53◦	550 km	20◦

Tableau 2. Paramètres de formation.

	Paramètre	Valeur
Paramètre réseau	Ng	24
		100
	Lq pak	1 Ko
Paramètre d'apprentissage	N.-B.	32
	Bmax	100
	α	0,6
		0,5
	βρ	0,8

Les performances de l'algorithme MHMRD (Minimum Hop Count Multipath Path Discovery-based) proposé, qui distribue le trafic de bout en bout dans des proportions égales à plusieurs chemins précalculés, a été testé en premier. Sur cette base, l'algorithme GMTS a été formé en utilisant la topologie de la constellation en orbite inclinée et les matrices de trafic [37], qui ont été déployés à la CCN après la formation et testés pour des paramètres clés tels que la moyenne le débit, la latence et le taux d'achèvement du flux du réseau satellite. Ce qui suit des algorithmes de comparaison ont été utilisés dans cet article :

- Algorithme du chemin le plus court en premier (SPF) : SPF utilise le délai de transmission moyen comme métrique de lien dans le but de minimiser le délai total.
- Routage coopératif à trajets multiples basé sur le codage réseau (NCMCR) [24] : NCMCR est conçu pour relever les défis de routage posés par une topologie en constante évolution et une connectivité potentiellement clairsemée et intermittente. L'algorithme NCMCR prend avantage de la prévisibilité du mouvement relatif des satellites, avec une topologie variable dans le temps modélisée sous forme de carte spatio-temporelle.
- Routage de base multivoies basé sur Ant pour l'équilibrage de charge (AMBRLB) [38] : afin pour surmonter les problèmes de débordement de trafic et de surcharge, un équilibrage de charge basé sur les fourmis Un algorithme de routage de backbone multivoies dans MANET a été proposé. Dès l'initiation de transmission par un nœud source vers un nœud destination, l'optimisation de la colonie de fourmis (ACO) est utilisé pour identifier plusieurs chemins avec la probabilité la plus élevée de succès.

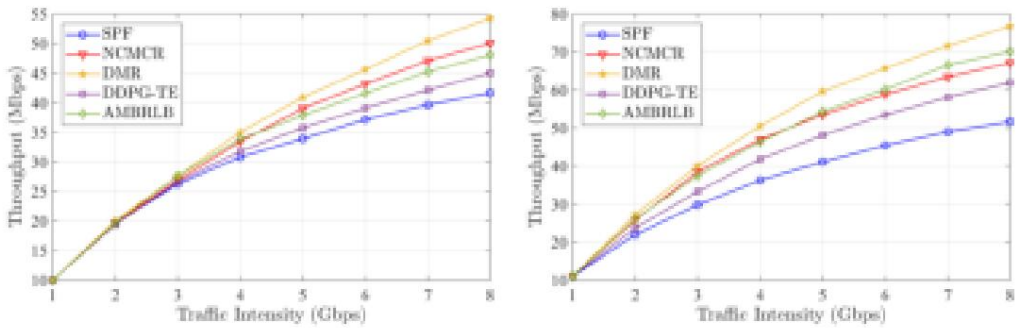
Machine Translated by Google

- Ingénierie de trafic à gradient de politique déterministe profond (DDPG-TE) [39] : Cette méthode utilise l'algorithme DDPG pour allouer dynamiquement les proportions de trafic des différents chemins de transmission. Il convient de noter que le modèle n'est pas applicable à des constellations de satellites arbitraires, car les dimensions des espaces d'état et d'action sont limitées par la taille de la topologie d'entrée et des matrices de trafic.

5.2. Résultats et analyse

5.2.1. Débit Le

débit moyen du MCN sur la constellation Iridium et la constellation OneWeb est illustré dans la figure 6, chaque point de données représentant la valeur moyenne du débit sous cinq instantanés topologiques consécutifs. On peut observer que, dans le contexte du routage multivoies, à mesure que le volume de trafic d'entrée augmentait, une plus grande proportion de trafic était allouée à plusieurs chemins pour le transfert, sur la base de différentes politiques. Cela a entraîné une augmentation globale du débit moyen du réseau. Néanmoins, l' augmentation du débit s'est progressivement ralentie. L'algorithme DMR proposé présentait un débit supérieur pour différentes tailles d'utilisateurs. DMR a amélioré le débit moyen de 30,26 % et 8,45 % par rapport à SPF et NCMCR, respectivement, lorsque le volume total de service a atteint sa limite supérieure. La figure 6b illustre le débit du routage multivoie sur la constellation OneWeb. On peut observer que DMR a utilisé le même modèle que celui utilisé pour la constellation Iridium, tandis que les autres algorithmes ont été recyclés en fonction des caractéristiques du nouveau réseau. On peut observer que l'algorithme DMR a continué à démontrer des performances supérieures par rapport aux autres algorithmes de référence dans le contexte de changements dans la topologie et la taille de la constellation, reflétant la capacité de généralisation améliorée du DMR. Lorsque l'intensité du trafic était de 8 Gbps, DMR a démontré une amélioration du débit moyen de 42,64 % et 9,55 % par rapport à SPF et NCMCR, respectivement.



(un) (b)

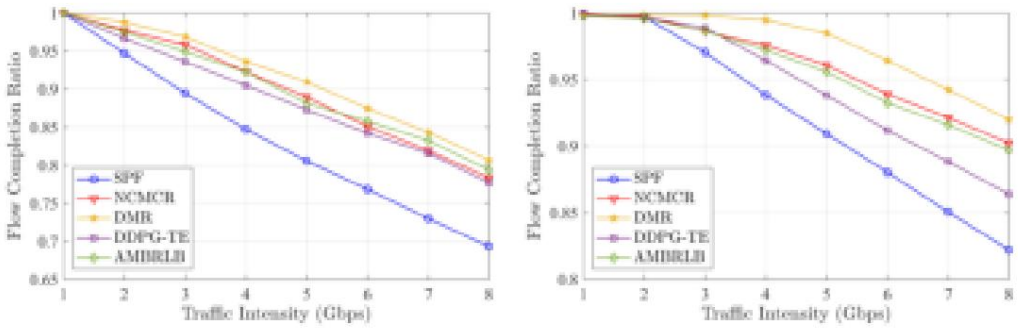
Figure 6. Débit moyen sur différentes constellations avec différentes intensités de trafic. (a) Débit moyen pour Iridium. (b) Débit moyen pour OneWeb.

5.2.2. Taux d'achèvement du débit moyen

La figure 7 illustre le taux d'achèvement de flux moyen pour différentes intensités de trafic sur les constellations Iridium et OneWeb. À mesure que l'intensité du trafic augmentait, certains nœuds du réseau devenaient progressivement encombrés. Ceci est démontré par une tendance à la baisse des taux moyens d'achèvement des flux des cinq schémas de routage. Avec une intensité de trafic de 8 Gbit/s, le taux moyen d'achèvement du flux du système DMR proposé a été amélioré de 17,39 % et 11,52 % sur les constellations Iridium et OneWeb, respectivement, par rapport au SPF. Pendant ce temps, sur la constellation OneWeb, le taux d'achèvement moyen du flux de l' algorithme DMR s'est amélioré de 1,98 %, 2,58 % et 6,49 % par rapport à NCMCR, AMBRLB et DDPG-TE, respectivement. Par conséquent, on peut constater que le taux d'achèvement moyen du flux sur la plus grande constellation OneWeb était systématiquement supérieur à celui de la plus petite constellation Iridium, même avec des intensités de trafic variables. Cela démontre l'avantage des constellations à grande échelle pour gérer des charges élevées. On peut donc conclure qu

Machine Translated by Google

Le schéma DMR proposé démontre une capacité de généralisation supérieure dans différentes constellations d'échelle, avec un taux d'achèvement de flux plus élevé que le schéma de base.



(un) (b)

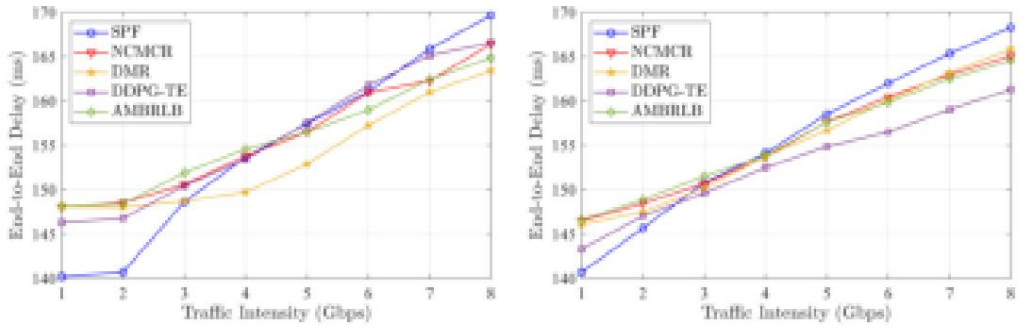
Figure 7. Taux d'achèvement du flux moyen de différentes constellations avec différentes intensités de trafic. (a) Taux d'achèvement de flux moyen pour la constellation Iridium. (b) Taux d'achèvement des flux moyen pour la constellation OneWeb.

5.2.3. Délai moyen de bout en bout La

figure 8 illustre le délai moyen de bout en bout en fonction de l'intensité du trafic sur les constellations Iridium et OneWeb. À mesure que la charge du réseau augmentait, le délai de mise en file d'attente augmentait également, avec davantage de flux transmis le long des chemins candidats avec un nombre de sauts plus élevé. Par conséquent, le délai moyen de bout en bout a progressivement augmenté pour tous les systèmes comparés. Dans la constellation Iridium, SPF a atteint le délai de bout en bout le plus faible lorsque la charge du réseau était faible. Cela est dû au fait que le système transmet toujours les paquets par le chemin le plus court lorsque tous les liens du réseau sont dans un état normal. À mesure que la charge du réseau augmente, lorsque le volume total de service atteint la limite supérieure, SPF est incapable de modifier dynamiquement le chemin pour éviter les chemins encombrés causés par l'augmentation de la charge. Par conséquent, sur la constellation Iridium, le système DMR a réduit le délai moyen de bout en bout de 3,67 %, 1,78 %, 1,86 % et 0,86 % par rapport à SPF, NCMCR, DDPG- TE et AMBRLB, respectivement. Lors de l'extension du routage multivoies à des constellations OneWeb plus grandes, le délai pour DMR s'est approché de celui de NCMCR, AMBRLB et DDPG-TE lorsque l'intensité du trafic a atteint sa limite supérieure. Cela est dû au fait que le schéma DMR et le schéma DDPG-TE prennent en compte la répartition dynamique du trafic sur différents chemins. En général, le délai moyen de bout en bout du DMR à charge élevée se situait entre ceux du SPF et du DDPG-TE. L'objectif principal du routage multivoies est d'améliorer le débit et la résilience du réseau lorsque la topologie est perturbée. Dans les constellations à petite échelle, le routage multivoie offre des options de routage supplémentaires qui peuvent être utilisées pour contourner les nœuds encombrés en temps opportun, réduisant ainsi le délai. Cependant, dans les constellations à grande échelle, il existe toujours suffisamment de routes alternatives, et l'amélioration des mesures de retard de bout en bout n'est pas substantielle.

Les résultats expérimentaux démontrent que le schéma SPF avec le chemin le plus court présentait un retard moyen plus faible dans les scénarios à faible charge. Cependant, le SPF présentait le débit moyen et le taux d'achèvement de flux moyens les plus faibles, et ses performances se détérioraient rapidement dans des conditions de charge élevée. En revanche, le schéma DMR proposé présentait un meilleur débit moyen et un meilleur taux d'achèvement du flux sous différentes charges, ainsi qu'une meilleure capacité de généralisation sur des constellations de différentes tailles et topologies sans formation répétée.

Machine Translated by Google



(un) (b)

Figure 8. Délai moyen de bout en bout pour différentes constellations avec diverses intensités de trafic. (a) Délai moyen de bout en bout pour la constellation Iridium. (b) Délai moyen de bout en bout pour la constellation OneWeb.

6. Conclusions

Cet article propose une solution de routage multivoies (DMR) basée sur l'apprentissage par renforcement profond (DRL) pour les réseaux satellitaires. L'objectif était de résoudre le problème de transmission par routage multivoie dans les réseaux de mégaconstellations LEO. L'approche DMR proposée divise le routage multivoies en deux sous-problèmes : la sélection de routes multivoies et la planification du trafic multivoies. Dans le contexte du sous-problème de sélection de chemins multiples, cet article propose un schéma de routage centralisé, MHMRD, qui génère un ensemble de chemins disponibles pour les nœuds de bout en bout. Ceci est réalisé en collectant des informations sur l'état du nœud en fonction du nombre de sauts minimum de bout en bout actuel et de l'utilisation des liaisons. Dans le sous-problème de planification du trafic à trajets multiples, une planification du trafic à trajets multiples (GMTS) ba
Chaque nœud de routage est contrôlé par un agent DQN, et le GNN est utilisé pour résoudre le problème des topologies de réseaux satellites topologiquement variables. Le modèle optimal de planification du trafic multivoies a été obtenu grâce à une formation itérative. Le schéma DMR proposé a finalement été validé sur deux tailles différentes de mégaconstellations dans l'environnement de simulation NS3.
Les résultats de la simulation démontrent que le schéma DMR proposé présentait des performances supérieures en termes de débit moyen du réseau et de taux d'achèvement de flux moyen par rapport au schéma de base. En outre, le système DMR a permis d'aborder efficacement le routage du réseau satellite dans le cadre d'un équilibrage de charge tout en maintenant une augmentation minimale des coûts de retard. De plus, le schéma DMR conçu dans cet article a présenté une évolutivité et une adaptabilité favorables dans le contexte de topologies de constellation en évolution. Il est également capable d'être étendu à des réseaux satellitaires avec des topologies changeantes sans nécessiter de formation supplémentaire.

Il convient de noter qu'à mesure que la taille de la constellation continue de croître, les exigences de calcul du routage en ligne basé sur DQN augmentent également. À l'avenir, nous avons l'intention d' explorer le potentiel de l'adoption de solutions telles que le déploiement multi-contrôleurs pour améliorer la réactivité du réseau et valider davantage son efficacité dans des scénarios du monde réel.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, CH ; méthodologie, CH; logiciel, RY; validation, WX ; analyse formelle, CH; enquête, WX ; ressources, WX ; conservation de données, CH; rédaction – préparation de l'ébauche originale, CH ; rédaction —révision et révision, CH; visualisation, CH; supervision, WX; administration de projet, WX et RY ; acquisition de financement, WX et RY Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par le National Key Laboratory Fund Project sous le numéro de subvention 614201003022207 et par le Aerospace Discipline Education New Engineering Project sous le numéro de subvention 145AXL250004000X.

Déclaration de disponibilité des données : les données pertinentes et le code source de cet article sont accessibles en contactant hanchi@hgd.edu.cn.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Machine Translated by Google

Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce manuscrit :

DRL	Apprentissage par renforcement profond
Routage multivoies basé sur DMR DRL	
MHMRD Algorithme de découverte de routage multivoie basé sur le nombre minimum de sauts	
Réseau neuronal GNN Graph	
Planification du trafic multivoies basée sur GMTS GNN	
Réseau MCN Mégaconstellation	
SAGIN Réseau intégré espace-air-sol	
ISL	Liaisons inter-satellites
SDN	Réseau défini par logiciel
RAAN Ascension droite du nœud ascendant	
CCN	Centre de contrôle du réseau
LEO	Orbite terrestre basse
Réseau DQN Deep Q	

Les références

1. Jiang, X. ; Huang, Y. ; Li, J. ; Il h.; Chen, S. ; Yang, F. ; Yang, J. Routage spatio-temporel, codage redondant et planification multivoies pour la transmission déterministe par réseau satellite. IEEETrans. Commun. 2023, 71, 2860-2875. [Référence croisée]
2. Kodheli, O. ; Lagunas, E. ; Maturo, N. ; Sharma, Saskatchewan ; Shankar, B. ; Montoya, JFM; Duncan, JCM; Spano, D. ; Chatzinotas, S. ; Kisseleff, S. ; et coll. Les communications par satellite dans la nouvelle ère spatiale : une enquête et les défis futurs. Communique IEEE. Survivre. Tuteur. 2021, 23, 70-109. [Référence croisée]
3. Rakhmanov, A. ; Wiseman, Y. Compression des données GNSS dans le but d'accélérer la communication avec les véhicules autonomes. Remote Sens.2023 , 15, 2165. [CrossRef]
4. Correia, SD; Pérez, R. ; Matos-Carvalho, J. ; Leithardt, VRQ µJSON, un schéma de compression léger pour la transmission de données GNSS intégrées sur les nœuds IoT. Dans Actes de la 5e Conférence 2022 sur le Cloud et l'Internet des objets (CIoT), Marrakech, Maroc, 28-30 mars 2022 ; pp. 232-238.
5. Xue, C. ; Li, W. ; Yu, L. ; Shang, J. ; Chen, X. ; Lu, S. SERO : Un cadre d'itinérance transparente basé sur un modèle pour le maillage sans fil Réseau avec TCP multivoie. IEEETrans. Commun. 2019, 67, 1284-1296. [Référence croisée]
6. Liu, X. ; Maman, T. ; Qin, X. ; Zhou, H. ; Zhao, L. Un routage coopératif à trajets multiples optimisé par DRL pour les réseaux satellite LEO ultra-denses. Dans les actes du GLOBECOM 2023, Kuala Lumpur, Malaisie, 4-8 décembre 2023 ; pages 5961 à 5966.
7. Li, R. ; Zhang, J. ; Zheng, S. ; Wang, K. ; Wang, P. ; Zhang, X. Algorithme de routage des méga-constellations LEO basé sur la segmentation de zone. Dans les actes de la conférence IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC) 2023, Glasgow, Royaume-Uni, 26-29 mars 2023 ; p. 1 à 6.
8. Li, Y. ; Zhang, Q. ; Yao, H. ; Gao, R. ; Xin, X. ; Yu, FR Stigmergie et apprentissage hiérarchique pour l'optimisation du routage dans les réseaux satellites collaboratifs multi-domaines. IEEE J. Sélectionnez. Zones Commun. 2024, 42, 1188-1203. [Référence croisée]
9. Perkins, CE ; Royer, EM Routage vectoriel de distance ad hoc à la demande. Dans les actes du WMCSA'99. Deuxième atelier de l'IEEE sur les systèmes et applications informatiques mobiles, Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, 25 et 26 février 1999 ; pp. 90-100.
10. Jiang, F. ; Zhang, Q. ; Yang, Z. ; Yuan, P. Un routage multitrajet basé sur un graphique espace-temps pour l'observation de la Terre tolérante aux perturbations Réseaux satellitaires. IEEETrans. Aérosp. Électron. Système. 2019, 55, 2592-2603. [Référence croisée]
11. Huang, Y. ; Yang, D. ; Feng, B. ; Tian, A. ; Dong, P. ; Yu, S. ; Zhang, H. Un algorithme de routage multi-trajets compatible GNN pour les Réseaux satellitaires LEO à variation temporelle. IEEETrans. Véh. Technologie. 2024, 73, 5454-5468. [Référence croisée]
12. Huang, Y. ; Jiang, X. ; Chen, S. ; Yang, F. ; Yang, J. Approche intelligente de planification du trafic à trajets multiples incitée aux phéromones pour Réseaux satellitaires LEO. IEEETrans. Fil. Commun. 2022, 21, 5889-5902. [Référence croisée]
13. Tian, A. ; Feng, B. ; Zhou, H. ; Huang, Y. ; Bien, K. ; Yu, S. ; Zhang, H. Mise en cache coopérative fédérée efficace basée sur DRL pour mobile Réseaux périphériques. IEEETrans. Réseau. Servir. Gérer. 2023, 20, 246-260. [Référence croisée]
14. Huang, X. ; Yuan, T. ; Qiao, G. ; Ren, Y. Apprentissage par renforcement approfondi pour le contrôle du trafic multimédia dans un logiciel défini La mise en réseau. Réseau IEEE. 2018, 32, 35-41. [Référence croisée]
15. Lei, K. ; Guo, P. ; Wang, Y. ; Wu, X. ; Zhao, W. Résoudre les problèmes de routage avec un réseau neuronal d'attention à graphique de bord résiduel. Neuroinformatique 2022, 508, 79-98. [Référence croisée]
16. Zheng, X. ; Huang, W. ; Li, H. ; Li, G. Recherche sur la technologie de routage intelligent généralisé basée sur un réseau neuronal graphique. Électronique 2022, 11, 2952. [CrossRef]
17. Wei, H. ; Zhao, Y. ; Xu, K. G-Routing : routage en ligne flexible basé sur des réseaux de neurones graphiques. Réseau IEEE. 2023, 37, 90-96. [Référence croisée]
18. Rusek, K. ; Suarez-Varela, J. ; Almasan, P. ; Barlet-Ros, P. ; Cabellos-Aparicio, A. RouteNet : Exploitation des réseaux de neurones graphiques pour la modélisation et l'optimisation de réseaux dans SDN. IEEE J. Sélectionnez. Zones Commun. 2020, 38, 2260-2270. [Référence croisée]
19. Bi, Y. ; Accrocher.; Xu, S. ; Wang, X. ; Lin, C. ; Yu, Z. ; Sun, P. Réseaux intégrés spatio-terrestres définis par logiciel : architecture, Défis et solutions. Réseau IEEE. 2019, 33, 22-28. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

20. Hu, M. ; Xiao, M. ; Hu, Y. ; Cai, C. ; Deng, T. ; Peng, K. Multidiffusion définie par logiciel utilisant le routage de segments dans les réseaux satellite LEO. IEEETrans. Foule. Calculer. 2024, 23, 835-849. [Référence croisée]
21. Han, Z. ; Xu, C. ; Zhao, G. ; Wang, S. ; Cheng, K. ; Yu, S. Modèle de topologie variable dans le temps pour le routage dynamique dans les réseaux de constellations de satellites LEO. IEEETrans. Véh. Technologie. 2023, 72, 3440-3454. [Référence croisée]
22. Giambene, G. ; Luong, Danemark ; De Cola, T. ; Le, VA; Muhammad, M. Analyse d'une approche de codage par blocs au niveau des paquets pour Systèmes mobiles terrestres-satellites. IEEETrans. Véh. Technologie. 2019, 68, 8117-8132. [Référence croisée]
23. Chen, Z. ; Zhou, W. ; Wu, S. ; Cheng, L. Un protocole de routage multivoie adaptatif à la demande avec prise en charge de la QoS pour MANET haut débit . Accès IEEE 2020, 8, 44760-44773. [Référence croisée]
24. Tang, F. ; Zhang, H. ; Yang, LT Routage coopératif multivoies avec reconnaissance efficace pour les réseaux satellite LEO. IEEE Trans. Foule. Calculer. 2019, 18, 179-192. [Référence croisée]
25. Li, G. ; Zhou, H. ; Feng, B. ; Zhang, Y. ; Yu, S. Fourniture efficace de chaînes de fonctions de service dans les réseaux superposés à l'aide de renforts ment Apprentissage. IEEETrans. Informatique en nuage. 2022, 10, 383-395. [Référence croisée]
26. Kato, N. ; Fadlallah, ZM ; Mao, B. ; Tang, F. ; Akashi, O. ; Inoué, T. ; Mizutani, K. La vision du Deep Learning pour le contrôle du trafic réseau hétérogène : proposition, défis et perspectives futures. Fil IEEE. Commun. 2017, 24, 146-153. [Référence croisée]
27. Mao, B. ; Fadlallah, ZM ; Tang, F. ; Kato, N. ; Akashi, O. ; Inoué, T. ; Mizutani, K. Routage ou informatique ? Le changement de paradigme vers une transmission intelligente de paquets sur réseau informatique basée sur l'apprentissage profond. IEEETrans. Calculer. 2017, 66, 1946-1960. [Référence croisée]
28. Geyer, F. ; Carle, G. Apprentissage et génération de protocoles de routage distribués à l'aide du Deep Learning basé sur des graphiques. Dans Actes de l'atelier 2018 sur l'analyse des mégadonnées et l'apprentissage automatique pour les réseaux de communication de données, Budapest, Hongrie, 20 août 2018 ; p. 40-45.
29. Liu, C. ; Xu, M. ; Yang, Y. ; Geng, N. DRL-OR : Routage en ligne basé sur l'apprentissage par renforcement approfondi pour les exigences de service multi-types. Dans Actes de la conférence IEEE INFOCOM 2021 — IEEE sur les communications informatiques, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 10-13 mai 2021 ; p. 1 à 10.
30. Almasan, P. ; Suárez-Varela, J. ; Rusek, K. ; Barlet-Ros, P. ; Cabellos-Aparicio, A. L'apprentissage par renforcement profond rencontre les réseaux de neurones graphiques : exploration d'un cas d'utilisation d'optimisation de routage. Calculer. Commun. 2022, 196, 184-194. [Référence croisée]
31. Soleil, P. ; Guo, Z. ; Li, J. ; Xu, Y. ; Lan, J. ; Hu, Y. Permettre un routage évolutif dans les réseaux définis par logiciel avec un apprentissage par renforcement approfondi sur les nœuds critiques. Trans. IEEE/ACM. Réseau. 2022, 30, 629-640. [Référence croisée]
32. Kim, G. ; Kim, Y. ; Lim, H. Routage basé sur l'apprentissage par renforcement profond sur des réseaux définis par logiciel. Accès IEEE 2022, 10, 18121-18133. [Référence croisée]
33. Jiang, Z. ; Wu, Q. ; Li, H. ; Wu, J. scMPTCP : Transfert multivoie coopératif SDN pour réseau satellite avec détection de charge. Accès IEEE 2018, 6, 19823-19832. [Référence croisée]
34. De Santis, E. ; Giuseppi, A. ; Pietrabissa, A. ; Capponi, M. ; Delli Priscoli, F. Intégration des satellites dans la 5G : renforcement en profondeur Apprentissage pour la sélection de réseau. Mach. Intell. Rés. 2022, 19, 127-137. [Référence croisée]
35. Constellation de l'iridium. Disponible en ligne : https://celestrak.org/NORAD/elements/table.php?GROUP=iridium (consulté le 30 juillet 2024).
36. Constellation OneWeb. Disponible en ligne : https://celestrak.org/NORAD/elements/table.php?GROUP=oneweb (consulté le 30 juillet 2024).
37. Archives de trafic du groupe de travail MAWI. Disponible en ligne : https://mawi.wide.ad.jp/mawi/ (consulté le 30 juillet 2024).
38. Francis Antony Selvi, P. ; Manikandan, Routage de base multivoies basé sur MSK Ant pour l'équilibrage de charge dans MANET. IET Commun. 2017, 11, 136-141. [Référence croisée]
39. Chen, B. ; Soleil, P. ; Zhang, P. ; Lan, J. ; Acheter.; Shen, J. Ingénierie du trafic basée sur l'apprentissage par renforcement profond dans un réseau hybride IP/SR. Commune de Chine. 2021, 18, 204-213. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Conception d'un compensateur de perturbations basée sur une LMI dilatée pour Systèmes linéaires à paramètres variables

Mustafa ˙ Inci 1 et Yusuf Altun 2,*

1 Centre de conception Volta Motor Industry and Trade Inc., usine Cumayeri, 81700 Düzce, Turquie ; mustafa@volta.com.tr

2 Département de génie informatique, Université de Düzce, 81620 Düzce, Türkiye * Correspondance : yusufaltun@duzce.edu.tr

Résumé : Cet article présente une nouvelle représentation d'inégalité matricielle linéaire dilatée (LMI) pour concevoir un contrôleur à rétroaction d'état et un compensateur de perturbation à action directe dynamique pour les systèmes à paramètres linéaires variables (LPV). Les LMI améliorées sont convexes et de dimension finie sans aucune approche itérative. Les conceptions sont basées sur un nouveau lemme réel borné équivalent (BRL) proposé au moyen d'une dilatation matricielle pour les systèmes LPV et les systèmes linéaires incertains sous incertitudes paramétriques variables dans le temps (TVPU). Ce BRL dilaté fournit des résultats conservateurs inférieurs à ceux des méthodes existantes en termes de stabilité robuste. En conséquence, un compensateur de perturbation dynamique est conçu en plus d'un contrôleur à rétroaction d'état. Cet article se concentre principalement sur la conception de compensateurs contre les perturbations en plus de la conception de contrôleurs à retour d'état. Les matrices dynamiques du compensateur évoluent avec les paramètres variables dans le temps du LPV ou du système incertain pendant le fonctionnement, en supposant que les perturbations et les paramètres sont mesurables ou observables. Le compensateur peut être conçu pour atténuer les perturbations/bruits ou pour améliorer l Enfin, des résultats numériques et de simulation sont présentés pour prouver à la fois l'efficacité et le caractère moins conservateur des IMT proposées.

Mots-clés : rétroaction LPV ; compensateur de perturbations ; Contrôle H∞ ; BRL dilaté ; contrôle robuste

check for updates

Citation : ˙ Inci, M. ; Altun, Y. Conception du compensateur de perturbations Basé sur LMI dilatée pour linéaire Systèmes à paramètres variables. Électronique 2024, 13, 3055. https://doi.org/10.3390/électronique13153055

Rédacteur académique : Luca Patanè

Reçu : 5 juillet 2024
Révisé : 26 juillet 2024
Accepté : 29 juillet 2024
Publié : 1 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Des analyses robustes des performances des systèmes LPV, qui constituent une classe particulière de systèmes non linéaires, et des systèmes linéaires avec des incertitudes paramétriques variables dans le temps (TVPU) ont attiré une attention considérable. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses LMI basées sur les critères de stabilité de Lya-punov ont été proposées pour ces systèmes puisque l'efficacité des méthodes basées sur LMI est bien connue, comme par exemple [1–4]. La plupart d'entre elles sont basées sur la fonction de Lyapunov quadratique standard connue sous le nom de stabilité quadratique, où une seule fonction de Lyapunov quadratique est utilisée comme dans [5]. Par exemple, une comparaison numérique est effectuée en termes de conservativité des conditions de stabilité quadratique dans [6]. Cependant, de nombreuses études ont montré qu'une matrice de Lyapunov dépendante des paramètres (PDLM) surmonte la prudence dérivée d'une fonction de Lyapunov quadratique unique pour les systèmes tels que ceux de [6-13]. Cependant, il n'est pas approprié pour les systèmes LPV ou le système à temps continu (CTS) sous TVPU sans méthode supplémentaire puisque le PDLM ou le LMI paramétré (PLMI) provoque un problème d'optimisation non convexe. Cependant, le PDLM diminue le conservatisme résultant des conditions de stabilité quadratique. Pour résoudre ce problème, certaines approches ont été proposées telles que la méthode de la grille [14], la procédure s [15], la méthode multi-convexité [15,16] et les méthodes de [17,18]. Néanmoins, la méthode du maillage n'est valable que pour des conditions de fonctionnement locales contraires aux trajectoires de paramè De plus, les autres approches impliquent des conditions LMI supplémentaires, certaines restrictions ou complexités en dehors des LMI existantes pour obtenir une solution convexe lorsque le PDLM est utilisé. De plus, ces approches ne permettent pas de concevoir des systèmes de contrôle polyvalents.

Machine Translated by Google

dans [12]. De plus, un contrôleur à rétroaction d'état conçu à l'aide des procédés dépend d'une fonction de Lyapunov qui est restreinte par la propriété symétrique.

Récemment, afin de fournir une moindre prudence pour les systèmes incertains et LPV, des matrices de Lyapunov en fonction des paramètres ou des PLMI ont été étudiées sans conditions LMI supplémentaires. En conséquence, des LMI « dilatées » ou « étendues » ont été suggérées pour résoudre des problèmes non convexes et ont été très populaires au cours des deux dernières décennies. Les variables S et les LMI à variable slack (SV-LMI) sont également connues puisque les variables slack sont généralement utilisées pour les LMI [19]. L'avantage des LMI dilatés est que des résultats plus conservateurs sont obtenus pour de très grands ensembles de paramètres puisqu'ils ne contiennent pas la multiplication de la matrice de Lyapunov avec les matrices d'espace d'état du système contrairement aux LMI courants comme dans [5]. Ce cas nous permet également de vérifier les performances de robustesse ou de stabilité, et une formulation LMI convexe est obtenue pour les systèmes grâce à la séparation. De plus, les LMI dilatés se sont avérés des outils précieux pour concevoir des contrôleurs multi-objectifs avec une plus faible conservativité, comme dans [20]. En bref, l'approche LMI dilatée présente une solution convexe et des résultats conservateurs inférieurs pour le LPV ou les systèmes linéaires incertains sans aucune condition supplémentaire malgré le PDLM, ce qui conduit à une non-convexité ou à des LMI infinis dans les conceptions courantes. Par exemple, une condition de stabilité est proposée dans [8,21], mais une conception de contrôle H∞ n'est pas abordée. Dans [20], un avantage évident des LMI dilatés par rapport aux LMI classiques est présenté pour la conception de contrôleurs multi-objectifs de stabilité H2/D, mais cette formulation ne peut pas être étendue à la synthèse de contrôles H∞ . Dans [22], le contrôle H2 via une variable de mou est proposé, mais le contrôle H∞ n'est pas abordé. Dans [23], des conditions LMI dilatées plus conservatrices sont proposées sous des paramètres variant rationnellement, mais elles ne sont pas appropriées pour un CTS avec des systèmes TVPU et LPV. En dehors de ces études, les améliorations du contrôle par rétroaction d'état dans [24–31] en utilisant des LMI dilatées sont plus remarquables dans la littérature en termes de conservatisme et/ou de simplicité. Ces études sont moins conservatrices que la conception standard du contrôleur à rétroaction d'état dans [1]. Cependant, aucun d'entre eux n'est totalement approprié pour les systèmes LPV et CTS sous TVPU alors qu'ils sont améliorés pour CTS sous incertitudes paramétriques invariantes dans le temps (TIPU). De plus, l'IMT dilatée proposée surpasse la TIPU en termes de conservativité. En conséquence, ce sujet spécifique est encore ouvert dans la littérature, en particulier pour les systèmes CTS avec TVPU et LPV. Par conséquent, la première contribution de cet article est qu'un nouveau BRL dilaté est proposé pour les systèmes LPV et CTS avec TVPU. Ceci est ensuite étendu pour résoudre le problème c
Par conséquent, des résultats moins conservateurs sont obtenus pour les systèmes LPV ou les CTS avec TVPU selon les résultats existants dans la littérature.

Les compensateurs ou contrôleurs à action directe sont utilisés pour suivre le signal de référence ou pour atténuer les perturbations externes ou internes, qui sont pour la plupart prévisibles ou mesurables comme dans [32,33]. Les performances du système sont améliorées grâce à un signal de commande supplémentaire généré conformément aux perturbations mesurées ou aux valeurs de référence. En particulier, des compensateurs de perturbations ont été réalisés pour de nombreux systèmes, comme par exemple [34]. Un compensateur de perturbations est utilisé avec un contrôleur de rétroaction comme dans [35,36], car la conception de rétroaction garantit la stabilité de l'installation. Cependant, le compensateur n'assure pas la stabilité du système instable. Il existe deux méthodes principales. La première est qu'ils sont conçus simultanément comme dans [37,38]. Pour le second, une certaine performance est préalablement obtenue avec le contrôleur de rétroaction, puis la partie feedforward est conçue comme dans [39]. Cet article est basé sur la deuxième approche. De nombreux compensateurs ou contrôleurs à action directe ont été présentés pour les systèmes LTI tels que ceux des études ci-dessus. Il existe quelques travaux via la méthode H∞ , notamment pour les systèmes LPV, comme dans [40–45]. Dans [40], un contrôleur H∞ , d'ordre réduit, a été conçu pour traiter les perturbations du système vibratoire.

Dans [41], une conception de contrôleur dynamique H∞ feedforward a été abordée en obtenant l'inverse du système. Dans [42], une commande anticipative robuste commutée a été présentée pour une classe de systèmes linéaires incertains définis sous une forme de transformation fractionnaire linéaire classique. Cependant, aucun d'entre eux n'est approprié pour les systèmes LPV. Dans [43,44], des conceptions à action prospective LPV statiques sont utilisées, mais ce ne sont pas des contrôleurs dynamiques. Un contrôleur dynamique à action anticipée a été conçu pour les systèmes LPV dans [45], mais de nombreuses LMI existent car certaines LMI supplémentaires

Machine Translated by Google

des conditions sont nécessaires en raison de la non-convexité liée à l'utilisation du PDLM. De plus, le
Les IMT sont basées sur un BRL commun, elles sont donc quelque peu conservatrices en raison de la
multiplication de la matrice de Lyapunov. Par conséquent, le contrôleur ou compensateur à action directe basé
sur le gain L2 a rarement été discuté, en particulier pour les systèmes LPV. De plus,
une conception de contrôleur à action anticipée dynamique ou de compensateur n'a pas été utilisée dans ce qui précède
études, obtenant les avantages du LMI dilaté. Par conséquent, la deuxième contribution
de cet article est l'utilisation d'un compensateur dynamique LPV à action directe basé sur un gain L2
conception du contrôleur pour bénéficier des avantages de l'approche LMI étendue, qui, selon
L'étude de la littérature n'a pas encore été rapportée dans la littérature. Dans [45], qui est plus proche
Pour cet article, l'étude est assez complexe en raison de l'apparition d'une infinité de LMI. Dans
De plus, la conception est basée sur la norme BRL, ce qui produit des résultats plus conservateurs.

En bref, dans cette étude, des solutions basées sur des LMI non itératives sont proposées pour concevoir
un contrôleur de rétroaction d'état LPV et un compensateur dynamique à action anticipée LPV. Ils sont
pratique pour LPV et CTS avec TVPU (systèmes linéaires avec incertitude paramétrique).
Les principales contributions de l'article sont les suivantes :

(1) Un BRL dilaté basé sur une LMI non itérative est proposé pour les CTS avec TVPU et
Système LPV en offrant les avantages d'un jeu variable et d'un LMI dilaté. Puis un
le nouveau contrôleur de retour d'état est conçu sur la base d'un nouveau BRL équivalent. Avec
en ce qui concerne sa supériorité, il a le meilleur résultat parmi les études récentes dans [5,24–30] en
il est considéré comme moins conservateur, comme le montre le tableau 1, et environ 10 %
une amélioration a été obtenue à partir du meilleur résultat parmi eux.

(2) Toutes les solutions proposées ne nécessitent aucune condition LMI supplémentaire comme dans [45] en raison
au BRL dilaté proposé même si le PDLM est utilisé, ce qui conduit à une non-convexité ou à des LMI
infinis. Ils sont plus simples et moins conservateurs que les
approches de la littérature et moins conservatrices que des études similaires dans la littérature, comme
le prouvent les tests numériques. Par conséquent, les IMT offrent à la fois simplicité et
moindre conservatisme.

(3) Un compensateur dynamique LPV à action directe basé sur le BRL dilaté est proposé.
pour les systèmes LPV avec perturbations ou bruits mesurables ou observables. Donc,
le compensateur fonctionne en ligne avec les incertitudes paramétriques variables dans le temps de
systèmes incertains ou les paramètres variables dans le temps pour les systèmes LPV.

Tableau 1. Comparaisons des γmin obtenus.

	[5]	[24]	[25]	[26]	[27]	[28]	[29]	[30]	Théorème proposé 1
γmin	1,557	1,498	1,478	1,476	1,251	1,241	1,240	1,241	1.118

2. Préliminaires

Dans cette section, quelques définitions et lemmes sont donnés pour éclairer le modèle proposé.
lemme et théorèmes.

Définition 1. Le système décrit en (1) est appelé système LPV. Ici, $x(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$ représente
les états, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ représente les signaux d'entrée de contrôle, $z(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$ représente les signaux d'entrée contrôlés
sorties, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ représente les sorties mesurées, $\omega(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$ représente les perturbations
et les matrices entières sont de taille appropriée et dépendent de paramètres α changeant avec le temps.
Les jeux de paramètres sont définis par (2) où Δ_R et Δ_D désignent les jeux de paramètres pour α et
son dérivé, respectivement. De plus, la matrice $A(\alpha)$ est la matrice d'état qui définit le
relation entre l'état actuel et son taux de changement, $B_1(\alpha)$ est la matrice d'entrée de
perturbation , $B_2(\alpha)$ est la matrice d'entrée de contrôle, $C_1(\alpha)$ est la matrice qui relie le vecteur d'état $x(t)$ à
sorties contrôlées $z(t)$, $D_{11}(\alpha)$ est la matrice de rétroaction pour l'entrée de perturbation $\omega(t)$ directement
reliant l'entrée de perturbation $\omega(t)$ à la sortie contrôlée $z(t)$, $D_{12}(\alpha)$ est la matrice de rétroaction
pour l'entrée de commande $u(t)$ reliant directement l'entrée de commande à la sortie commandée $z(t)$, $C_2(\alpha)$ est
la matrice de sortie mesurée définissant la relation entre l'état et la sortie mesurée.

Machine Translated by Google

En d'autres termes, D21(α) est la matrice de rétroaction pour l'entrée de perturbation reliant directement l'entrée de perturbation ω(t) à la sortie mesurée y(t) et D22(α) est la matrice de rétroaction pour l' entrée de commande u(t) reliant directement l'entrée de commande à la sortie mesurée y(t).

$$\begin{aligned} &. x(t) = A(\alpha(t))x(t) + B1(\alpha(t))\omega(t) + B2(\alpha(t))u(t)\ z(t) \\ &= C1(\alpha(t))x(t) + D11(\alpha(t))\omega(t) + D12(\alpha(t))u(t)\ y(t) = \\ &C2(\alpha(t))x(t) + D21(\alpha(t))\omega(t) + D22(\alpha(t))u(t) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\Delta R = \alpha \quad n : \alpha i \le \alpha i \le \overline{\alpha i}, \quad i = 1, \ldots, \Delta D = \alpha \quad n : \alpha i, \ n \\ &i = 1, \ldots, \alpha i \le \alpha i \le \end{aligned} \tag{2}$$

De plus, la forme en boucle fermée du système peut être écrite comme dans (3) où Z indique les sorties z et y. De plus, les matrices A, B, C et D sont considérées comme des matrices en boucle fermée.

$$\begin{aligned} &. x(t) = UNE(\alpha(t))x(t) + B(\alpha(t))\omega(t) \\ &Z(t) = C(\alpha(t))x(t) + D(\alpha(t))\omega(t) \end{aligned} \tag{3}$$

On suppose que les paramètres sont disponibles en ligne (mesurables ou calculables). De plus, les paramètres sont dérivés des états du système non linéaire bien que celui-ci ressemble normalement à un système incertain. Si les paramètres ne sont pas dérivés d'états, contrairement à ceux du système LPV, (1) est le système linéaire sous incertitudes variables dans le temps comme dans l'exemple 1.

La norme H∞ pour le système dans (3) peut être calculée via la formulation LMI commune donnée par le lemme 1, bien connue sous le nom de BRL dans la littérature. En conséquence, pour a (0 ∞ est un scalaire définissons l'indice de performance par (4), où ω(t) L perturbation exogène. $_2^q$ γ positif , nous

$$J(\omega, z) = z \quad ^T z - \gamma\ 2\omega\ T\omega\ d\tau \tag{4}$$

Lemme 1. Soit G(α) la matrice de transfert stable du système LPV dans (3) pour tout I − DT admissible (α)D(α) trajectoires des paramètres. Si et seulement ^{2} 0, G(s)∞ . γ et les α Δ suivants D. si les énoncés γ sont équivalents pour tout (α) ΔR et

(je) S'il existe une matrice symétrique différentiable définie positive P(α) n×n , alors

$$\begin{aligned} &_{UN}{}^T(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha) + C^T(\alpha)C(\alpha) \\ &+ B^T(\alpha)P(\alpha) + DT(\alpha)C(\alpha) \quad _{2\,y}\ je - DT(\alpha)D(\alpha)\ ^{-1}\ B^T(\alpha)P(\alpha) + DT(\alpha)C(\alpha) \quad 0 \end{aligned} \tag{5}$$

(ii) S'il existe une matrice symétrique différentiable définie positive P(α) n×n , alors

$$\begin{aligned} &_{UN}{}^T(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha)\ P(\alpha)B(\alpha)\ C(\alpha)P(\alpha)^T(\alpha) \\ &B^T \qquad\qquad _{2-\gamma}\ Je\ DT(\alpha) \qquad 0 \\ &C(\alpha) \qquad ré(\alpha) \qquad -Je \end{aligned} \tag{6}$$

Remarque 1. Les LMI tels que ceux de (6) ne conviennent pas pour concevoir des contrôleurs pour des systèmes linéaires avec des paramètres incertains de type polytopique ou affine ou des systèmes LPV puisque l'inégalité implique la multiplication de la matrice de Lyapunov par les matrices de la plante. Par conséquent, cette affaire aboutit à une optimisation non convexe et à des LMI infinis. Néanmoins, certaines méthodes ont été suggérées pour éliminer cette difficulté comme la méthode de la grille [14], la procédure s [15], la méthode multi-convexité [11] et les méthodes de [17,18]. Cependant, la méthode multi-convexité et la procédure s donnent lieu à de nombreuses LMI, et la méthode de la grille n'est valable que pour les conditions de fonctionnement locales, contrairement aux trajectoires de paramètres tout à fait admissibles. De plus, de telles techniques ne permettent pas la conception d'un contrôleur polyvalent dans [12]. L'utilisation de la fonction Lyapunov indépendante des paramètres (f

Machine Translated by Google

dans (7) comme dans [5,41,46] est courant, mais cela conduit à des résultats très conservateurs. À l'inverse, lorsque la fonction de Lyapunov est isolée des matrices végétales à l'aide d'une variable slack, généralement appelée approche LMI dilatée ou étendue en raison de la dimension élargie de la LMI, cela permet de diminuer le conservatisme de l'analyse et de la conception, comme dans [23,24,27,31]. Par conséquent, atteindre une condition dilatée équivalente au BRL est une approche efficace pour surmonter cette complexité dans les conceptions de contrôle robustes telles que H2 et H∞. En conséquence, une nouvelle notation pour le calcul de H∞ incluant le TVPU a été proposée dans le Lemme 3 pour la conception de contrôleurs.

Le LMI standard dans (7) dérivé du lemme 1 est généralement utilisé pour le gain L2) pour les systèmes LPV ou plan H∞ ($K(\alpha) = R(\alpha)P^{-1}$ dans la littérature [5].

$$\begin{matrix} {}^{UN}T(\alpha)P + B_2R(\alpha) + (\quad)^T & B_1(\alpha) & PC_1^T(\alpha) + R^T(\alpha)D_{12}^T \\ * & -\gamma^2 Je & D_{11}^T(\alpha) \\ * & * & -Je \end{matrix} \quad 0 \tag{7}$$

Le lemme 2 suivant, basé sur le lemme de projection, est utile pour dériver les LMI dilatés.

Lemme 2. [21] : S'il existe une matrice symétrique Ω et des matrices dimensionnelles compatibles Θ1, Θ2, alors, les conditions suivantes sont équivalentes :

je. $\Omega < 0$ et $\Omega + \Theta_1\Theta^T + \Theta_2\Theta^T < 0$ ii. Le problème LMI suivant est réalisable conformément à Q.

$$\begin{matrix} \Omega & \Theta_2 + \Theta_1 Q \\ \Theta_2^T + Q^T\Theta^T & -Q - Q^T \end{matrix} \quad 0$$

3. Un nouveau lemme réel borné et dilaté

Dans cette section, un BRL dilaté est proposé pour les systèmes LPV et incertains. En conséquence, une solution basée sur LMI est améliorée pour concevoir le contrôleur de rétroaction d'état H∞ . Le lemme 3 montre le BRL dilaté.

Lemme 3. Soit G(α) la matrice de transfert du système LPV dans (3), alors les deux énoncés suivants sont équivalents.

je. Si et seulement si la matrice A(α) est stable pour toutes les trajectoires de paramètres admissibles et $D_T(\alpha)D(\alpha) - {}_{2y}I \quad 0$, la performance H∞ pour le système dans (3) est bornée telle que l'indice $\gamma > 0$. Ainsi, $G_{z\omega} \quad \infty \quad \gamma$.

ii. S'il existe une matrice symétrique différentiable définie positive et dépendante des paramètres $P(\alpha)$ $\dot{P}(\alpha) \quad {}^{n\times n}$, une constante positive réelle μ satisfaisant $\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0$ et une matrice dimensionnelle compatible Q, alors le problème LMI dans (8) est valable pour tout $\alpha \quad \Delta R$ et $\alpha \quad \Delta D$.

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & 0 & P(\alpha) + {}^{UN}T(\alpha)Q + \mu Q & C^T(\alpha) \\ * & -\gamma^2 Je & B^T(\alpha)Q & D_T(\alpha) \\ * & * & -Q - Q^T & 0 \\ * & * & * & -Je \end{matrix} \quad 0 \tag{8}$$

Preuve du lemme 3. La forme LPV de l'inégalité dans l'énoncé i du lemme 1 est la suivante.

$$\begin{aligned} &{}^{UN}T(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha) + C^T(\alpha)C(\alpha) \\ &+ B^T(\alpha)P(\alpha) + D_T(\alpha)C(\alpha) \quad {}^T{}_{2y}je - D_T(\alpha)D(\alpha) \quad ^{-1}\ B^T(\alpha)P(\alpha) + D_T(\alpha)C(\alpha) \quad 0 \end{aligned} \tag{9}$$

Machine Translated by Google

L'inégalité dans (9) est modifiée comme suit, lorsqu'une variable réelle constante μ est incluse dans l'inégalité.

$$\begin{matrix} {}^{UN}{}^{T}(\alpha) + \mu I\ P(\alpha) + P(\alpha)(A(\alpha) + \mu I) + C & {}^{T}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \\ + B\ {}^{T}(\alpha)P(\alpha) + D^{T}(\alpha)C(\alpha) & {}^{T}{}_{2\gamma}\ je - D^{T}(\alpha)D(\alpha) \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} B^{T}(\alpha)P(\alpha) + D^{T}(\alpha)C(\alpha) \\ 0 \end{matrix}$$

En utilisant le lemme de Schur, une nouvelle inégalité matricielle est obtenue comme suit.

$$\begin{matrix} \Gamma 11(\alpha) & \Gamma 12(\alpha) \\ \Gamma 13(\alpha) & \Gamma 14(\alpha) \end{matrix} \quad 0$$

où

$$\begin{aligned} \Gamma 11(\alpha) &= A\ {}^{T}(\alpha) + \mu I\ P(\alpha) + P(\alpha)(A(\alpha) + \mu I) + C\ {}^{T}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \\ \Gamma 12(\alpha) &= P(\alpha)B(\alpha) + C\ {}^{T}(\alpha)D(\alpha), \\ \Gamma 13(\alpha) &= B\ {}^{T}(\alpha)P(\alpha) + D^{T}(\alpha)C(\alpha) \\ \Gamma 14(\alpha) &= D^{T}(\alpha)D(\alpha) - \gamma\ {}^{2}{}_{je} \end{aligned}$$

Nous pouvons réécrire l'inégalité comme suit.

$$\begin{matrix} {}^{UN}{}^{T}(\alpha) + \mu I\ P(\alpha) + (&) \\ B^{T}(\alpha)P(\alpha) & \end{matrix} \begin{matrix} {}^{T} \\ P(\alpha)B(\alpha)\ 0 \end{matrix} + \begin{matrix} C^{T}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & C^{T}(\alpha)D(\alpha) \\ D^{T}(\alpha)C(\alpha) & D^{T}(\alpha)D(\alpha) - \gamma\ {}^{2}{}_{je} \end{matrix} \quad 0 \qquad (10)$$

Ceci est réécrit comme suit.

$$\begin{matrix} C^{T}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & C(\alpha)\ TD(\alpha) \\ D^{T}(\alpha)C(\alpha) & D^{T}(\alpha)D(\alpha) - \gamma\ {}^{2}{}_{je} \end{matrix} + \begin{matrix} {}^{UN}{}^{T}(\alpha) + \mu I & P(\alpha)\ 0 + \begin{matrix} P(\alpha) & A(\alpha) \\ 0 & +\mu I \end{matrix} \\ B^{T}(\alpha) & B(\alpha) \end{matrix} \quad 0 \qquad (11)$$

Ensuite, on peut obtenir l'inégalité (12) si l'on applique le lemme 2 à (11).

$$\begin{matrix} 11(\alpha) & 12(\alpha) & 13(\alpha) \\ * & 22(\alpha) & 23(\alpha) \\ * & * & 33 \end{matrix} \quad 0 \qquad (12)$$

où

$$\begin{aligned} 11(\alpha) &= C^{T}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha), \\ 12(\alpha) &= C^{T}(\alpha)D(\alpha) \\ 13(\alpha) &= P(\alpha) + A\ {}^{T}(\alpha) + \mu IQ\ , \\ 22(\alpha) &= D^{T}(\alpha)D(\alpha) - \gamma\ {}^{2}{}_{je} \\ 23(\alpha) &= B^{T}(\alpha)Q, \quad 33 = -Q - QT \end{aligned}$$

Cependant, l'expression du côté gauche de (11) doit être définie négative selon le lemme 2. En conséquence, nous réécrivons l'expression incluant $\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0$ comme suit.

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & 0 \\ * & Je\ -\gamma^{2} \end{matrix} + \begin{matrix} C^{T}(\alpha) \\ D^{T}(\alpha) \end{matrix} Je\ C(\alpha)\ D(\alpha) \quad 0$$

On obtient donc l'inégalité (13) via le lemme de Schur.

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & 0° C\ {}^{T}(\alpha) \\ * & {}^{2}{}_{-\gamma}\ Je\ D^{T}(\alpha) \\ * & * \quad -Je \end{matrix} \quad 0 \qquad (13)$$

Machine Translated by Google

Finalement, on obtient (8) si l'on applique le lemme de Schur après avoir réécrit l'inégalité (12) comme le formulaire suivant. De plus, la condition (8) couvre également la condition (13).

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\,\mu P(\alpha)\ 0 \\ * \\ * \end{matrix} \quad \begin{matrix} Je & -\gamma^2 \\ * & \\ * & \end{matrix} \quad \begin{matrix} P(\alpha) + UNE^T(\alpha)Q + \mu Q \\ B^T(\alpha)Q \\ -Q - QT \end{matrix} + \begin{matrix} C^T(\alpha) \\ DT(\alpha) \\ 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} C(\alpha)\ D(\alpha)\ 0 \\ Je \end{matrix} \quad 0$$

La preuve est donc complète. □

Tous les modèles peuvent être utilisés pour des paramètres de type polytopique ou de type affine en établissant certaines réglementations. Cependant, des paramètres variables de type affine sont utilisés pour les exemples tout au long de cet article, et ainsi, toutes les matrices variant dans le temps changent de manière affine, comme la matrice de Lyapunov dans (14). Par conséquent, une stabilité quadratique affine est obtenue tout au long de l' article comme dans [11].

$$P(\alpha) = P0 + \sum_{je=1}^{n} \alpha_i P_i\,,\ \dot{P}(\alpha) = \sum_{je=1}^{n} \dot{\alpha}_i P_i \tag{14}$$

Théorème 1. Soit le système LPV dans (1) avec le paramètre variable dans le temps défini dans (2). S'il existe un scalaire réel positif μ satisfaisant $\dot{L}(\alpha) - 2\mu L(\alpha)\ 0$, la matrice différentiable définie positive symétrique L(α) avec les matrices de dimensions compatibles R, F(α), alors le LMI dans (15) est valable pour $\dot{\alpha}$ (α) ΔR et $\dot{\alpha}$ (α) ΔD. Ainsi, il existe un contrôleur de retour d'état H∞ K(α) = F(α)R^{-1}.

$$\begin{matrix} \dot{L}(\alpha) - 2\mu L(\alpha)\ 0 \\ \\ \end{matrix} \quad \begin{matrix} * & * & * \\ * & * & * \\ T & * & \end{matrix} \quad \begin{matrix} Je & -\gamma^2 & \\ & & \\ 0 & -Je & 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} * \\ * \\ * \end{matrix}$$
$$L(\alpha) + A(\alpha)R + B2F(\alpha) + \mu R \quad B1(\alpha) \quad -R - R \quad 0$$
$$C1(\alpha)R + D12F(\alpha) \quad D11(\alpha) \tag{15}$$

Preuve du théorème 1. Nous avons obtenu les matrices en boucle fermée dans (16) comme dans (17) lorsque le contrôleur u = K(α)x est substitué dans le système (1) où la sortie y(t) est éliminée puisqu'elle est considéré comme une rétroaction de l'État.

$$\begin{aligned} \dot{x}cl(t) &= Acl(\alpha(t))xcl(t) + Bcl(\alpha(t))\omega(t), \\ zcl(t) &= Ccl(\alpha(t))xcl(t) + Dcl(\alpha(t))\omega(t) \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} Acl(\alpha) &= A(\alpha) + B2K(\alpha),\ Bcl(\alpha) = B1(\alpha), \\ Ccl(\alpha) &= C(\alpha) + D12K(\alpha),\ Dcl(\alpha) = D11(\alpha) \end{aligned} \tag{17}$$

Si les matrices d'espace d'état de (17) sont remplacées dans (8), nous obtenons l'inégalité suivante.

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\,\mu P(\alpha)\ 0 \\ \\ \end{matrix} \quad \begin{matrix} * & * & * \\ * & * & * \\ & & * \end{matrix} \quad \begin{matrix} Je & -\gamma^2 & \\ & & \\ 0 & -Je & 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} * \\ * \\ * \end{matrix}$$
$$P(\alpha) + QT\,(A(\alpha) + B2K(\alpha)) + \mu QT \quad QTB1(\alpha) \quad -Q - QT$$
$$C(\alpha) + D12K(\alpha) \quad D11(\alpha)$$

Il existe cependant des multiplications de matrices inconnues. Pour obtenir le LMI, nous appliquons la transformation de congruence à l'inégalité en multipliant la transposée de (18) et (18), respectivement . Ainsi, (15) est obtenu, où L(α) = Q−TP(α)Q−1 , $\dot{L}(\alpha)$ = Q−T $\dot{P}(\alpha)$Q−1 , $\dot{Q}^{-1}$, F(α) = K (α)R. La preuve est donc complète. $\dot{R}$ = □

$$\text{diagnostic } Q^{-1}\,,\ je,\ \dot{Q}^{-1}\,,\ je \tag{18}$$

Remarque 2. La solution proposée apporte trois avantages significatifs. Premièrement, contrairement à (7), la matrice de Lyapunov peut se présenter sous la forme d'une matrice dépendante des paramètres sans approches supplémentaires telles que

Machine Translated by Google

comme la procédure s, la grille et la multi-convexité, ce qui réduit la conservativité. Deuxièmement, contrairement à la conception courante comme dans (7) dans [5], le gain du contrôleur est indépendant de la matrice de Lyapunov, qui est limitée par la propriété symétrique. Au lieu de cela, elle change avec une matrice non symétrique R pour le LMI proposé dans le théorème 1. Troisièmement, la variable de relâche réelle μ donne des résultats réalisables même pour de larges plages de paramètres, car une forte augmentation de la plage affecte moins la valeur de performance γ que des valeurs similaires dans termes de faisabilité et de performance, comme le prouvent les résultats numériques.

Si nous considérons CTS avec TVPU, nous pouvons facilement modifier le LMI pour une conception de contrôleur indépendante des paramètres (statiques ou fixes), comme dans le théorème 1, en supposant que les paramètres incertains sont à la fois inconnus au moment de la conception et non connus par la mesure en ligne, mais connus pour être délimité. Ainsi, certaines matrices sont converties en matrices dépendantes des paramètres tandis que d'autres matrices sont converties en matrices indépendantes des paramètres pour obtenir la forme du LMI. De plus, le théorème peut être utilisé pour les paramètres ou incertitudes variant dans le temps de type affine ou polytopique en établissant certaines réglementations. Cependant, des paramètres variables dans le temps de type affine sont pris en compte pour les conceptions tout au long de cet article. Deux exemples numériques ont été réalisés pour le contrôleur à retour d'état proposé. Tous les calculs numériques ont été effectués via l'analyseur Yalmip [47] et le solveur Sedumi [48], utilisés sur un PC (processeur 2 cœurs 2,8 GHz avec 4 Go de RAM). L'exemple 1 présente une conception de contrôleur pour le CTS avec le TIPU, tandis que l'exemple 2 présente une commande de gain programmée pour le CTS avec le TVPU.

Exemple 1. Le contrôleur de retour d'état pour le satellite dans [25,49] est adressé. Le système est constitué de deux corps rigides reliés par un lien flexible. Le système est comme dans (19). Les paramètres incertains sont modélisés comme l'amortissement f et le ressort k. La plage de k est [0,09 0,4] alors que la plage de f est [0,0038 0,04]. Les performances des méthodes de [5,24–30] et de la solution proposée dans le théorème 1 sont comparées en termes de niveau γ qui est directement lié à la conservativité. Les dérivées des paramètres sont nulles ; c'est-à-dire que les incertitudes ne sont pas différenciables.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -kk & -ffk & -kf & -f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} toi, \quad (19)$$

$$z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}01 \end{bmatrix} toi$$

Le tableau 1 montre les valeurs minimales de γ pour les résultats de [5,24–30] et la solution proposée dans le théorème 1 pour cet exemple. Les résultats indiquent que la solution proposée donne de bien meilleurs résultats que ceux des autres méthodes. Le gain de rétroaction de la solution commune est K = −105 [6,1116 44,042 1,1054 81,096], alors que celui de la solution proposée est K = −[205,82 2224,6 58,393 2850,9]. La supériorité de la solution proposée est qu'elle est moins conservatrice que [5, 24–30], comme dans le tableau 1. De plus, la figure 1a montre la relation entre μ et γ. Le niveau γ n'est presque jamais affecté par les changements de μ après une certaine valeur pour ce système. De plus, le théorème 1 proposé a le meilleur résultat même si μ est compris entre 2,5 et 35, comme le montre la figure 1a.

Remarque 3. La solution proposée pour le contrôle robuste H∞ peut être utilisée pour le CTS avec TVPU en obtenant les avantages des variables LMI/slack dilatées, mais les autres solutions dans [5,24–30] ne peuvent être utilisées que pour le CTS avec TIPU. . De plus, l'IMT est non itérative. Par conséquent, la solution LMI dilatée non itérative inclut à la fois TIPU et TVPU en offrant les avantages de la LMI dilatée. Son existence n'a pas été rapportée dans la littérature. En conséquence, l'exemple 1 présente une conception de contrôleur pour le CTS avec le TIPU tandis que l'exemple 2 présente une conception de contrôleur pour le CTS avec

Machine Translated by Google

le TVPU. Enfin, l'exemple 2 présente uniquement une comparaison entre cet article et la norme méthode de [5] puisque les études du tableau 1 , à l'exception du plan standard de [1], ne sont pas entièrement valables pour le TVPU. Les performances sont testées en élargissant l'ensemble incertain du TVPU dans l'exemple 2.

Exemple 2. Dans cet exemple, le contrôle LPV de planification de gain est conçu à l'aide du théorème 1 pour le système LPV généré aléatoirement dans (20) où les plages des paramètres variables dans le temps α1 et α2 sont respectivement [0,01, 2] et [0,5, 1,5]. De plus, les taux de variation pour le paramètres $\dot{\alpha}1$ et $\dot{\alpha}2$ sont respectivement [0, 3] et [0, 1].

$$\begin{matrix}\dot{x}1\\ \dot{x}2\\ \dot{x}3\end{matrix} = \begin{matrix}-\alpha1 & \alpha1 & 0{,}8\\ 0 & 0{,}2 & -\alpha2 - 1\\ & 0{,}5\alpha2 & 0{,}1\end{matrix} \begin{matrix}x1\\ x2\\ x3\end{matrix} + \begin{matrix}0{,}1\\ 0{,}2\\ 0\end{matrix} \omega + \begin{matrix}1\\ 0\\ 0{,}1\end{matrix} tu,$$

$$z = \begin{matrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{matrix} \begin{matrix}x1\\ x2\\ x3\end{matrix} + \begin{matrix}0\\ 0\end{matrix} \omega + \begin{matrix}0\\ 0{,}8\end{matrix} toi \quad (20)$$

Comme dans le tableau 2, l'amélioration augmente considérablement à mesure que l'ensemble incertain s'élargit. par rapport à l'ensemble commun. Par exemple, la méthode diminue le niveau γ à un taux de 78,59 % pour α1 = [0,01 50], α2 = [0,1 190].

Tableau 2. Les valeurs de performances γmin pour TVPU.

	Valeurs γ								
	α1= [0,01 2], α2= [0,5 1,5]			α1= [0,01 5], α2= [0,1 19]			α1= [0,01 50], α2= [0,1 190]		
[5]	1,0280			6.3151			22.745		
Théorème 1	0,890 (μ = 3) 14,42% en baisse			2,2466 (μ = 2,5) 64,42% de diminution			4,869 (μ = 3,5) 78,59% de diminution		
	Ensembles de variables Slack pour la faisabilité								
Théorème 1	μ = (0, 9 × 105]			μ = (0, 8 × 105]			μ = (0, 8 × 105]		
	Nombre d'itérations—Nombre de variables—Temps du solveur								
[5]	15	18	0,0174 s	28	18	0,126 s	49	18	0,215 s
Théorème 1	39	41	9,556 s	41	41	9,904 s	56	41	13.503 s

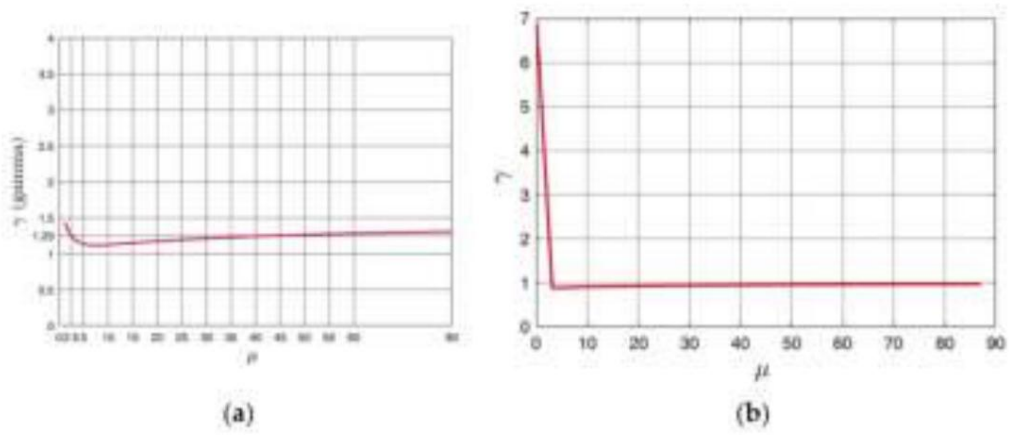


Figure 1. Les relations entre le niveau γ et la variable slack : (a) Exemple 1 ; (b) Exemple 2.

De plus, la relation entre μ et γ est illustrée à la figure 1b. Par conséquent, le γ le niveau n'est presque jamais modifié en changeant μ après une certaine valeur, sa détermination est donc facile de sorte que la solution proposée ait de meilleures performances que la solution courante même si μ est compris entre 1 et 85.

Machine Translated by Google

En référence à cela, les résultats sont obtenus pour la solution proposée dans le théorème 1 et le plan commun dans [5], où la matrice de Lyapunov est fixée. Pour α1 = [0,01 2], α2 = [0,5 1,5], le plan commun donne un niveau γ de 1,028, alors que la méthode proposée donne 0,890 pour μ = 3. En conséquence, les gains de rétroaction du plan standard et du plan dans le théorème 1 sont K0 = 103 [−23.383 170.568 −269.482], K1 = [0.30251 −2.2045 3.4833], K2 = [0.11503 −0.84184 1.33] et K0 = [−12.17 74.915 −102.05], = [0,9135 −3,0938 3,5387], K2 = [5,306 −40,69 47,744], respectivement. La relation entre μ et γ est illustrée à la figure 1b.

D'après les résultats, la solution LMI dilatée proposée est moins conservatrice que la LMI commune dans [5] pour la conception d'ordonnancement des gains, bien qu'elle présente des inconvénients qui sont un plus grand nombre d'itérations, un plus grand nombre de variables et un temps de résolution plus élevé. La faisabilité est obtenue pour le grand ensemble incertain dans le tableau 2, et la variable slack μ fournit des résultats réalisables pour un grand ensemble (0, 8 × 105]. Bien que le nombre de variables LMI soit passé de 18 à 41 selon la variable standard dans [5], une amélioration allant jusqu'à 78,59 % a été obtenue. Enfin, une bonne amélioration et des résultats moins conservateurs sont obtenus pour le TVPU même si les LMI dilatés sont plus coûteux que le LMI standard. Les comparaisons dans l'exemple le sont notamment. faite pour la matrice de Lyapunov indépendante des paramètres dans [5]. Comme souligné dans la remarque 1, si PLDF est utilisé, des méthodes telles que la méthode multi-convexité [11] et les méthodes de [17, 18] sont utilisées. Les variables LMI et la complexité de [5] augmentent considérablement. Par exemple, une autre condition LMI de même taille doit être ajoutée. Par conséquent, la condition LMI proposée est considérée comme moins coûteuse car elle n'a qu'une seule condition LMI.

Deux exemples ont montré que la solution proposée présente des résultats moins conservateurs. De plus, il peut être entièrement utilisé pour le système LPV et le système incertain sous TVPU, mais les autres ne peuvent pas être utilisés à l'exception du LMI commun dans [5]. D' un autre côté, l'augmentation des limites des incertitudes ou des paramètres variant dans le temps augmente le caractère conservateur des IMT. Cependant, la conception basée sur l'IMT proposée permet d'obtenir des résultats moins conservateurs et plus réussis en plus d'une structure plus simple.

4. Conception de compensateurs de perturbations dynamiques pour les systèmes LPV

Le schéma fonctionnel de la conception du compensateur de perturbations est illustré à la figure 2, où NCF est le coefficient de normalisation ou le filtre. Ici, le compensateur dynamique à action anticipée est comme dans (21).

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c(\alpha)x_c(t) + B_c(\alpha)\omega(t) \\ u_c(t) &= C_c(\alpha)x_c(t) + D_c(\alpha)\omega(t) \end{aligned} \tag{21}$$

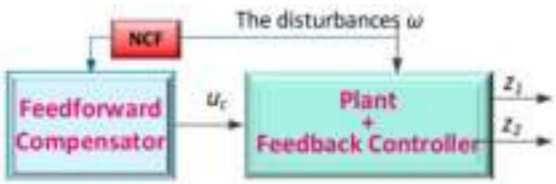


Figure 2. Schéma fonctionnel du compensateur de perturbations.

En conséquence, le théorème 2 présente une conception de compensateur de perturbation à action directe dynamique selon le LMI dilaté du lemme 3.

Théorème 2. Soit un système LPV stable dans (1) pour toutes les trajectoires admissibles de paramètres dont l'ensemble est comme dans (2). S'il existe un scalaire réel μ > 0, la matrice symétrique différentiable définie positive Y(α) et les matrices compatibles M, N(α), alors les LMI de (22) et (23) avec les définitions de (24) sont valables pour

$\dot{\alpha}$ ΔR et $\dot{\alpha}$ ΔD. Dans un tel cas, un compensateur dynamique H∞ à action directe dans (21) est obtenu à partir de (25).

Machine Translated by Google

$$\begin{matrix} \Psi 11(\alpha) & \Psi 12(\alpha) & \Psi 13(\alpha) & \Psi 14(\alpha) \\ * & \Psi 22(\alpha) & \Psi 23(\alpha) & \Psi 24(\alpha) \\ * & * & \Psi 33(\alpha) & \Psi 34 \\ * & * & * & \Psi 44 \end{matrix} \quad 0 \tag{22}$$

$$Oui(\alpha) = \begin{matrix} Y1(\alpha) & Y2(\alpha) \\ * & Y3(\alpha) \end{matrix} \quad 0 \tag{23}$$

$$\begin{aligned} \Psi 11(\alpha) &= \begin{matrix} \dot{Y}1(\alpha) - 2\mu Y1(\alpha) & \dot{Y}2(\alpha) - 2\mu Y2(\alpha) \\ * & \dot{Y}3(\alpha) - 2\mu Y3(\alpha) \end{matrix}, \\ \Psi 12(\alpha) &= \begin{matrix} 0 & Y1(\alpha) + R_1^T U_N^T(\alpha) + NT(\alpha) B_2^T + \mu R_1^T \\ 0 & Y1(\alpha) + R_1^T U_N^T(\alpha) + NT(\alpha) B_2^T + \mu R_2^T(\alpha) \end{matrix}, \\ \Psi 13(\alpha) &= \begin{matrix} Y2(\alpha) + MT(\alpha) R_1^T C_1^T(\alpha) + NT(\alpha) DT_{12} \\ Y3(\alpha) + MT(\alpha) R(\alpha)_1^T C_1^T(\alpha) + NT(\alpha) DT_{12} \end{matrix}, \\ \Psi 14(\alpha) &= \begin{matrix} R.^T C_2^T + NT(\alpha) DT(\alpha) + \\ R.^T C_{12}^T NT(\alpha) DT_{22} \end{matrix}, \Psi 22(\alpha) = \begin{matrix} \frac{2}{*} - \gamma & I B1(\alpha) + DT(\alpha) B_F^T \\ & -R1 - R_1^T \end{matrix}, \\ \Psi 23(\alpha) &= \begin{matrix} B_F^T(\alpha) & DT 11(\alpha) + D_F^T(\alpha) DT_{12} \\ -R1 - R_2^T(\alpha) & 0 \end{matrix}, \Psi 24(\alpha) = \begin{matrix} DT 21(\alpha) + D_F^T(\alpha) DT_{22} \\ 0 \end{matrix}, \\ \Psi 33(\alpha) &= \begin{matrix} -R2(\alpha) - R_2^T(\alpha), & 0 \\ * & -Je \end{matrix}, \Psi 34 = \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix}, \Psi 44 = -I \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} Ac &= M(\alpha) R_2^{-1}(\alpha), Bc(\alpha) = BF(\alpha), \\ Cc &= N(\alpha) R_2^{-1}(\alpha), Dc = DF(\alpha) \end{aligned} \tag{25}$$

Preuve du théorème 2. Le LMI dans (8) est multiplié par la matrice suivante et la transposée de la matrice du côté gauche-droit, respectivement lorsque nous appliquons la transformation de congruence.

$$\begin{matrix} Q^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & je & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & je \end{matrix}$$

Par conséquent, le LMI suivant est acquis selon les définitions de (27).

$$\begin{matrix} \dot{Y}(\alpha) - 2\mu Y(\alpha) & * & * & * \\ 0 & Je - \frac{2}{\gamma} & * & * \\ Y(\alpha) + A(\alpha) R + \mu R & B(\alpha)^T & -R - R^T & * \\ C(\alpha) R & ré(\alpha) & 0 & -Je \end{matrix} \quad 0 \tag{26}$$

$$Y(\alpha) = Q^{-T} P(\alpha) Q^{-1}, \dot{Y}(\alpha) = Q^{-T} \dot{P}(\alpha) Q^{-1}, R = Q^{-1} \tag{27}$$

La forme de l'espace d'état de ω(t) à Z(t) est comme dans (28) lorsque le compensateur dans (21) est réalisé en (1). Ici, le vecteur Z représente les sorties z et y, le vecteur X représente les états x dans (1) et xc dans (21) et ω est le signal de perturbation.

$$\begin{matrix} \dot{X}(t) \\ Z(t) \end{matrix} = \begin{matrix} Acl(\alpha) & Bcl(\alpha) \\ Ccl(\alpha) & Dcl(\alpha) \end{matrix} \begin{matrix} x(t) \\ \omega(t) \end{matrix} \tag{28}$$

En conséquence, les matrices d'espace d'états dans (28) sont obtenues comme dans (29) avec la réalisation. Par conséquent, le contrôleur optimal est obtenu en minimisant le gain L2 de ω à Z.

$$\begin{aligned} Acl(\alpha) &= \begin{matrix} A(\alpha) & B2Cc(\alpha) \\ Ac & \end{matrix}, Bcl(\alpha) = \begin{matrix} B1(\alpha) + B2Dc(\alpha) \\ \text{Avant JC} \end{matrix}, \\ Ccl(\alpha) &= \begin{matrix} C1(\alpha) & D12Cc(\alpha) \\ C2(\alpha) & D22Cc(\alpha) \end{matrix}, Dcl(\alpha) = \begin{matrix} D11(\alpha) + D12Dc(\alpha) \\ D21 + D22Dc(\alpha) \end{matrix} \end{aligned} \tag{29}$$

Machine Translated by Google

Définissons la matrice de Lyapunov comme dans (23), et la matrice R(ξ) est définie comme suit.

$$R(\alpha) = \begin{matrix} R1 & R1 \\ R2(\alpha) & R2(\alpha) \end{matrix}$$

En conséquence, si la matrice de Lyapunov Y(α) dans (23), sa dérivée, la matrice R(α) et les matrices d'espace d'état dans (29) sont placées dans (26) à la place de A(α), B(α) , C(α) et D(α), on obtient une inégalité matricielle. Si certaines expressions sont définies comme en (30), on obtient le LMI en (22) avec les définitions en (24) et la preuve est complète. □

$$M(\alpha) = Ac(\alpha)R2(\alpha),\ N = Cc(\alpha)R2(\alpha),\ BF(\alpha) = Bc(\alpha),\ DF(\alpha) = Dc(\alpha) \quad (30)$$

Remarque 4. Les IMT proposées offrent quatre avantages significatifs. Certaines sont mentionnées dans la remarque 2. Principalement, la matrice de Lyapunov peut être désignée sous la forme LPV, ce qui réduit le conservatisme, sans approches supplémentaires telles que la grille, la procédure s, la multi-convexité et les conditions de [17, 18]. Par exemple, de nombreuses LMI existent dans [45] puisque des conditions multi-convexités sont utilisées à cause de ces produits. De plus, les LMI sont basés sur le BRL commun dans (6), de sorte que les LMI sont quelque peu conservateurs en raison de la multiplication de la matrice de Lyapunov. Cependant, le BRL étendu proposé est le meilleur parmi ceux disponibles, comme le montre le tableau 1. Deuxièmement, en raison des produits de matrices système avec une matrice de Lyapunov comme dans (6), des LMI infinis et une optimisation non convexe se produisent, si la matrice de Lyapunov peut être sous la forme LPV. Cependant, un tel cas ne se produit pas pour la formulation LMI proposée dans (8). Il est donc clair que la solution proposée est plus simple. Troisièmement, les contrôleurs LPV conçus par PDLF comme dans [45,50] dépendent généralement de la dérivée de la matrice de Lyapunov (matrice Ac(α) du contrôleur). Cependant, l'opération dérivée pose des problèmes de bruit dans les applications pratiques en temps réel. Les conceptions proposées ne dépendent pas de la dérivée de la matrice de Lyapunov. Enfin, les matrices de contrôleur ne dépendent pas de la matrice de Lyapunov, qui est limitée par la condition symétrique dans les conceptions courantes. Au lieu de cela, les matrices dépendent d'une matrice complète dans les conceptions proposées. De plus, sa structure est simple.

Remarque 5. Le compensateur proposé n'inclut pas de contrôleur de rétroaction. Il est bien connu qu'une méthode de rétroaction est appliquée pour améliorer les performances de suivi de référence ou pour éliminer les perturbations ou le bruit, et elle n'affecte pas la stabilité, un contrôleur de rétroaction est donc nécessaire. Cependant, une conception de rétroaction n'est pas nécessaire pour certaines installations, comme de nombreux systèmes mécaniques et électriques, puisqu'il s'agit de systèmes stables. Par conséquent, le compensateur peut également être utilisé pour les systèmes stables avec des perturbations en plus des systèmes stabilisés avec un contrôleur de rétroaction. De plus, il peut être utilisé pour améliorer le suivi de référence en échangeant des signaux de référence au lieu d'entrées de perturbation pour les systèmes stabilisés avec un contrôleur de rétroaction. En conséquence, il est supposé que les systèmes sont stables ou stabilisés avec un contrôleur de rétroaction pour tous les exemples de cet arti Cependant, la stabilité interne du contrôleur/compensateur à action directe LPV doit être assurée pour tous les paramètres variant dans le temps, comme dans les théorèmes ci-dessus. Sinon, le système stable devient instable. Cette stabilité est obtenue en décomposant la matrice de Lyapunov sans avoir recours à une méthode de stabilité supplémentaire pour tous les théorèmes proposés.

5. Études de simulation

Dans cette section, un exemple numérique a été réalisé concernant la conception du compensateur. Tous les calculs d'optimisation numérique ont été effectués par Yalmip version R20210331 [47] et Sedumi version 1.30 [48], qui ont été utilisés sur un PC (CPU 2 cœurs 2,8 GHz avec 4 Go de RAM).

Exemple 3. Cet exemple montre la conception du compensateur LPV pour le système LPV généré aléatoirement dans (31). Les paramètres variables dans le temps α1(t) et α2(t) sont limités par (32). Bien qu'il apparaisse normalement comme un système linéaire indéterminé, il est considéré comme un système LPV en supposant

Machine Translated by Google

que les paramètres mesurables ou calculables sont des états du système non linéaire. Un système LPV est dérivé d'un système non linéaire, contrairement à un système linéaire incertain.

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t) + \frac{1}{6}\begin{matrix} 1 + \alpha 1(t) & -3 - \alpha 1(t) \\ -4 - \alpha 2(t) & -1 \end{matrix} 0{,}1\, x(t) + \begin{matrix} 0{,}5 + \alpha 1(t) \\ 0{,}8 \end{matrix} \omega(t) + \begin{matrix} 0{,}2 \\ 0{,}1 \end{matrix} \text{Utah)} \\ z(t) &= 1\ 0{,}1\, x(t) + (0{,}01)\omega(t) \\ y(t) &= 1\ 0\ x(t) \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} 0{,}1 \le \alpha 1(t) \le 0{,}7 \text{ avec } -0{,}445 \le . \ \alpha 1(t) \le 1{,}82 \\ 1 \le \alpha 2(t) \le 5 \text{ avec } -11{,}7 \le . \ \alpha 2(t) \le 2{,}295 \end{aligned} \tag{32}$$

Lorsque le système est analysé au vu de paramètres variant dans le temps, les résultats des figures 3 et 4 sont obtenus. Les différents paramètres variant dans le temps sont testés pour analyse sur la figure 3. Cependant, l'un d'eux est utilisé pour la simulation qui se trouve sur la figure 3b. La figure 3a n'est utilisée qu'à des fins d'analyse (diagramme de Bode et cartographie des pôles) car le changement de paramètre est supposé être linéaire. Il est généralement peu probable que les deux paramètres varient de manière linéaire. Le changement de paramètre sur la figure 3b se produit pendant la simulation. L'objectif est d'observer les réactions à différents changements paramétriques. Pour l'analyse, le diagramme de Bode du système est présenté à la figure 4 avec un temps d'échantillonnage de 50 ms et un temps d'échantillonnage de simulation de 100 µs La figure 4a montre le diagramme de Bode du système en supposant les paramètres variables dans le temps de la figure 3a, tandis que la figure 4b montre le diagramme de Bode en supposant les paramètres variables dans le temps de la figure 3b. La figure montre que les paramètres variables dans le temps affectent fortement la non-linéarité du système selon les diagrammes de Bode des sorties des entrées. D'après les diagrammes de Bode, la perturbation est plus efficace à environ 3 à 6 rad/s.
Par conséquent, les signaux de test de perturbation ont une basse fréquence.

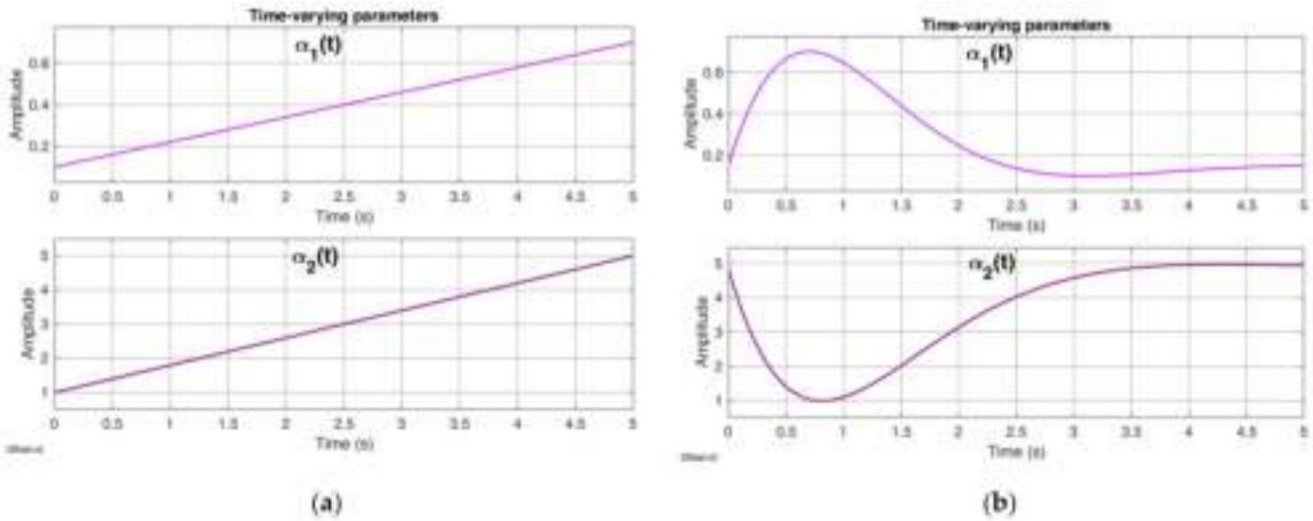


Figure 3. Paramètres variables dans le temps pour : (a) l'analyse ; (b) Analyse et simulation.

De même, la figure 5 présente la carte des pôles du système pour les différents paramètres variables dans le temps de la figure 3b où le temps d'échantillonnage est de 50 ms. De la carte des pôles, deux cas peuvent être déduits. Les pôles de l'ensemble des matrices de transfert du système sont dans la moitié gauche du plan. Ce cas confirme la stabilité du système conformément à tous les paramètres variables dans le temps mentionnés dans la remarque 5. Sinon, le compensateur ne peut pas être appliqué car il n'affecte pas la stabilité. L'autre est que les paramètres affectent fortement le système.

Machine Translated by Google

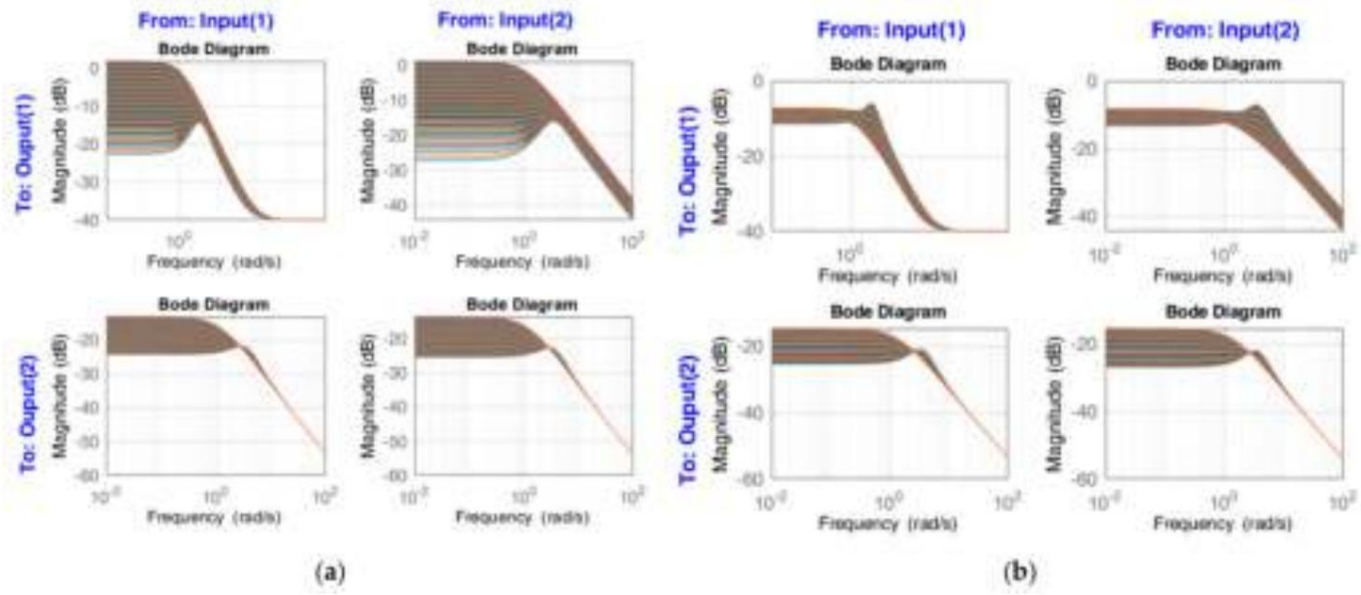


Figure 4. Diagrammes de Bode du système pour les paramètres variables dans le temps dans : (a) Figure 3a ; (b)Figure 3b.

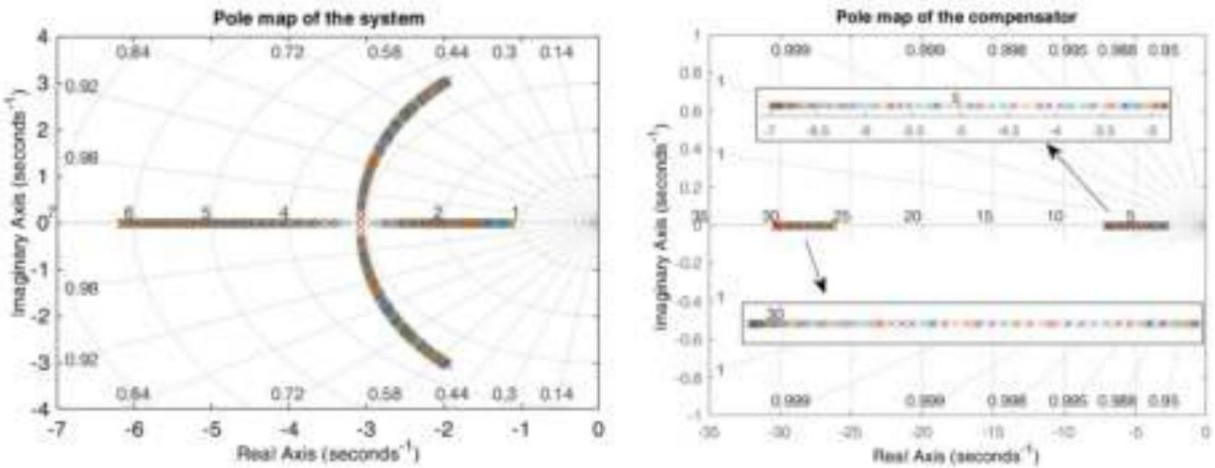


Figure 5. Cartes des pôles du système et du compensateur.

Pour la conception, la figure 6 montre un schéma fonctionnel pour la conception du compensateur LPV, où Wu et Wz représentent respectivement les filtres de pondération d'entrée et de sortie Cependant, un compensateur approprié est conçu sans ces filtres pour cet exemple. Cependant, les filtres peuvent être utilisés pour des raisons telles que des limitations structurelles mentionnées dans la remarque 6.

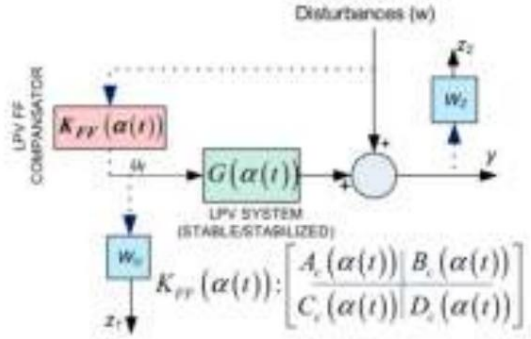


Figure 6. Schéma fonctionnel de conception du compensateur LPV.

Machine Translated by Google

Remarque 6. Les entrées et sorties sont limitées en raison de la structure mécanique/électrique.
Par conséquent, les contraintes doivent être considérées en fonction de la problématique du domaine concerné.
Par exemple, la déflexion de la suspension ne doit pas dépasser la limite supérieure, tandis que la déflexion des
pneus doit être minimisée autant que possible pour les systèmes de suspension active du véhicule. Il existe
certaines études basées sur l'IMT sur les contraintes d'entrée et de sortie, telles que [51]. Ceux-ci sont régulés avec
le NCF, comme le montre la figure 2. Le NCF peut être un coefficient ou un filtre tel qu'un filtre passe-bas qui est
déterminé en fonction du comportement du système en considérant les limites de fréquence et de gain des entrées
et des sorties. L'autre méthode concerne les fonctions de pondération d'entrée et de sortie pour la conception du
contrôleur H∞, comme le montrent la figure 6 et le schéma fonctionnel de [45]. Par conséquent, cela peut être
décidé pour NCF en tenant compte de la structure du système. En particulier, un filtre pour NCF peut être nécessaire
à haute fréquence au lieu d'un NC fixe. En effet, le compensateur en a besoin pour réguler la limite de l'actionneur à une fréque

Les matrices sont obtenues dans (33) lorsque les LMI du théorème 2 sont résolues pour minimiser la valeur γ en fonction des variables dépendantes des paramètres Yi , BFi, DFi, Mi , Ni pour i = 0, 1, 2 et des variables indépendantes des paramètres variables R1 et R2. Par conséquent, les matrices d'espace d'état des compensateurs LPV Aci, Bci, Cci et Dci dans (21) pour i = 0, 1 et 2 sont obtenues affinement à partir des matrices dans (33) selon les paramètres variables dans le temps α1(t) et α2(t) dans (32) pour tout t pendant l'opération en ligne. Par conséquent, (34) montre les matrices de contrôleur LPV de l'espace d'état.

$$
\begin{aligned}
M0 &= \begin{matrix} -163{,}81 & 12{,}724 \\ -1{,}7999 & -202{,}82 \end{matrix}, \quad M1 = \begin{matrix} 5{,}1074 & -22{,}914 \\ -11{,}194 & 36{,}474 \end{matrix}, \\
M2 &= \begin{matrix} -10{,}704 & 16{,}627 \\ 15{,}009 & -84{,}506 \end{matrix}, \quad R1 = \begin{matrix} 7{,}1371 & -3{,}0487 \\ -20{,}361 & 92{,}818 \end{matrix}, \\
R2 &= \begin{matrix} 7{,}139 & -3{,}0494 & -20{,}361 \\ 92{,}826 & N1 = -111{,}95 \end{matrix}, \quad N0 = -1175{,}1\ 1477{,}5, \\
&364{,}76\ -0{,}07727\ 0{,}51139, \quad N2 = -53{,}522\ 83{,}135\ 0{,}070224, \\
BC0 &= \begin{matrix} 0 & -0{,}46491 & 0 \end{matrix}, \quad BC1 = , \quad BC2 = , \\
&DC0 = -3{,}3213,\ DC1 = -4{,}6489,\ DC2 = -0{,}0003355
\end{aligned} \tag{33}
$$

$$
\begin{aligned}
Ac(\alpha1, \alpha2) &= \begin{matrix} -24{,}886 + 0{,}012541\alpha1 - 1{,}0907\alpha2 & -0{,}68047 - 0{,}24644\alpha1 + 0{,}14329\alpha2 \\ -7{,}1544 - 0{,}49361\alpha1 - 0{,}54525\alpha2 & -2{,}42 + 0{,}37671\alpha1 - 0{,}92828\alpha2 \end{matrix} \\
Bc(\alpha1) &= \begin{matrix} -0{,}07727 + 0{,}070224\alpha1 \\ 0{,}51139 - 0{,}46491\alpha1 \end{matrix} \\
Cc(\alpha1, \alpha2) &= -131{,}53 - 4{,}9366\alpha1 - 5{,}4537\alpha2\ \ 11{,}596 + 3{,}7674\alpha1 + 0{,}71644\alpha2 \\
Dc(\alpha1, \alpha2) &= -2{,}8863 - 4{,}6489\alpha1 - 0{,}0003355\alpha2
\end{aligned} \tag{34}
$$

En conséquence, la figure 7a montre le diagramme de Bode du compensateur pour les paramètres variables dans le temps de la figure 3a, tandis que la figure 7b le montre pour les paramètres variables dans le temps de la figure 3b pour un temps d'échantillonnage de 50 ms. Selon les cartes de pôles et les diagrammes de Bode, le compensateur LPV change de manière significative en fonction des paramètres variables dans le temps.

La valeur de μ est déterminée à 0,42 par ligne recherchant une bonne réponse. En conséquence , la valeur de l'indice de performance y est de 0,037268. Cette valeur change clairement en fonction du système et des filtres d'entrée-sortie. Il offre la possibilité de gérer de très grands paramètres variant dans le temps, comme le prouvent les exemples de conception de contrôleurs à retour d'état. La figure 8a montre également le diagramme de Bode du système combiné avec le compensateur depuis l' entrée de perturbation jusqu'aux sorties z et y en supposant les paramètres variables dans le temps de la figure 3a, tandis que la figure 8b montre le diagramme de Bode en supposant les paramètres variables dans le temps de la figu
La figure 9 montre les signaux de test de perturbation appliqués aux simulations. Il s'agit d'un signal de choc comme le montre la figure 9a ; signal sinusoïdal de 5 rad/s illustré à la figure 9b ; et signal de bruit blanc illustré sur la figure 9c.

Machine Translated by Google

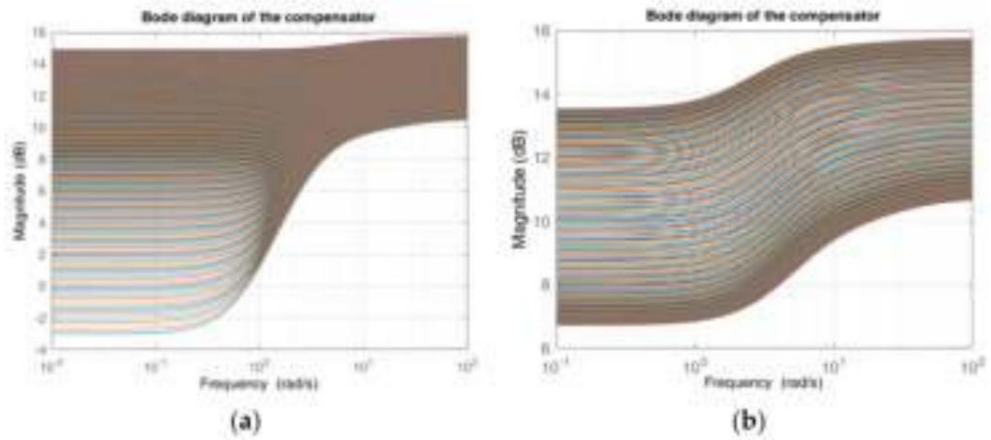


Figure 7. Diagrammes de Bode du compensateur pour les paramètres variant dans le temps dans : (a) Figure 3a ; (b)Figure 3b.

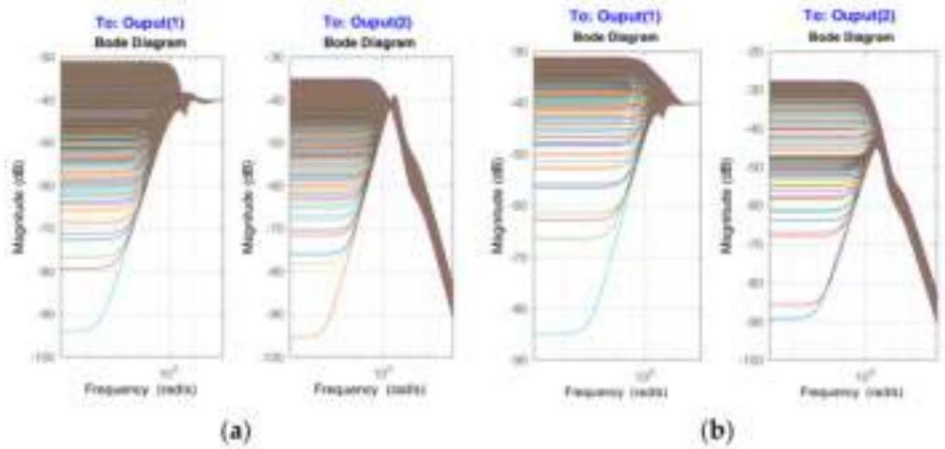


Figure 8. Diagrammes de Bode du système avec le compensateur pour les paramètres variables dans le temps dans : (a) Figure 3a ; (b)Figure 3b.

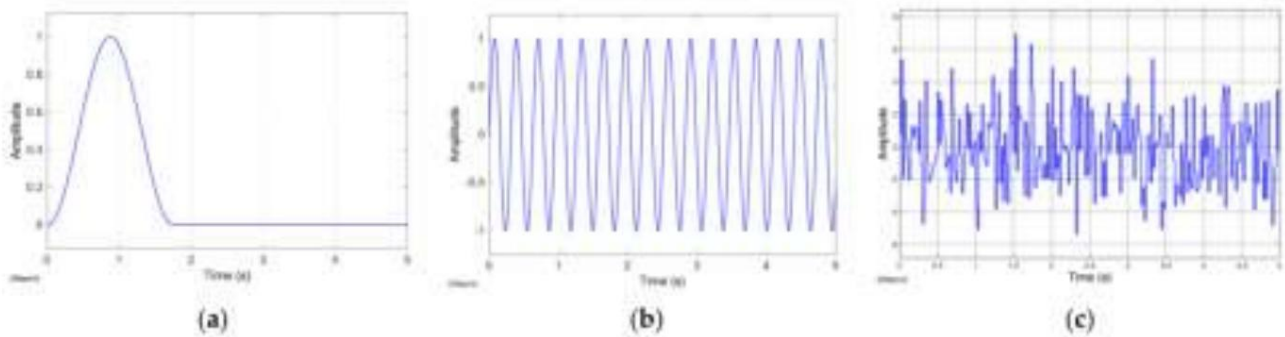


Figure 9. Perturbations de test appliquées : (a) une bosse ; (b) un signal sinusoïdal de 5 rad/s ; (c) un signal de bruit blanc.

En ce qui concerne les résultats, la figure 10 montre les sorties z et y pour le signal de perturbation externe de la figure 9a. Comme le montrent les sorties, le compensateur LPV conçu atténue efficacement les perturbations à un taux d'environ 100 % par rapport au cas sans compensateur.

Machine Translated by Google

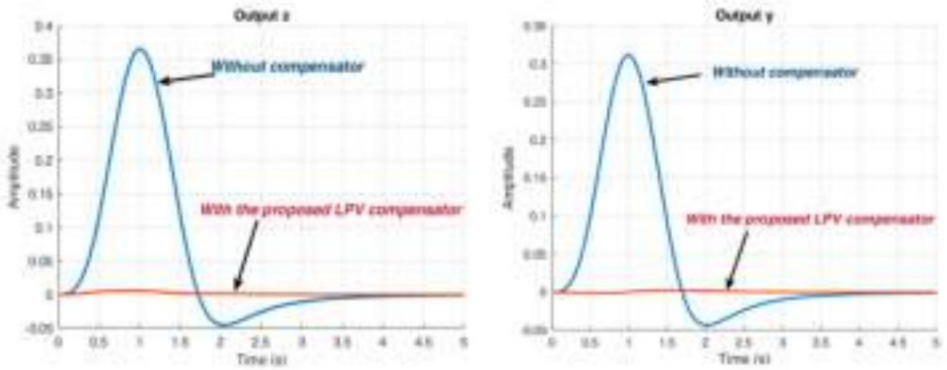


Figure 10. Les sorties z et y pour un signal de perturbation par bosse.

De même, les figures 11 et 12 montrent les sorties z et y pour les signaux de test de perturbation des figures 9b et 9c, respectivement. Les signaux générés par le compensateur dépendant des paramètres contre trois perturbations sont illustrés à la figure 13.

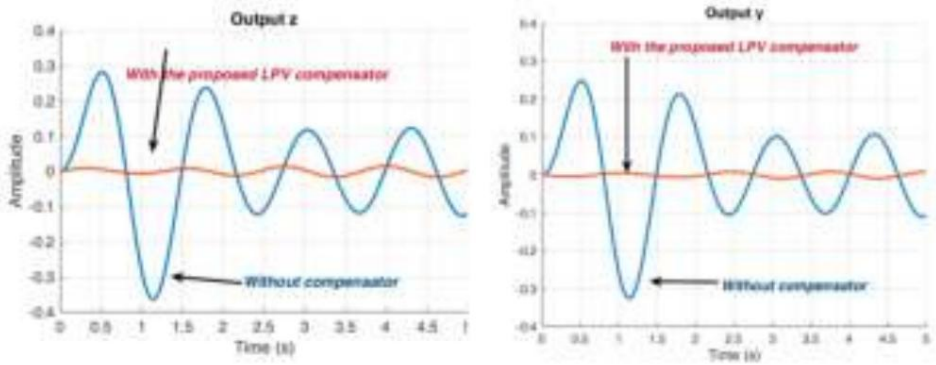


Figure 11. Les sorties z et y pour une perturbation sinusale de 5 rad/s.

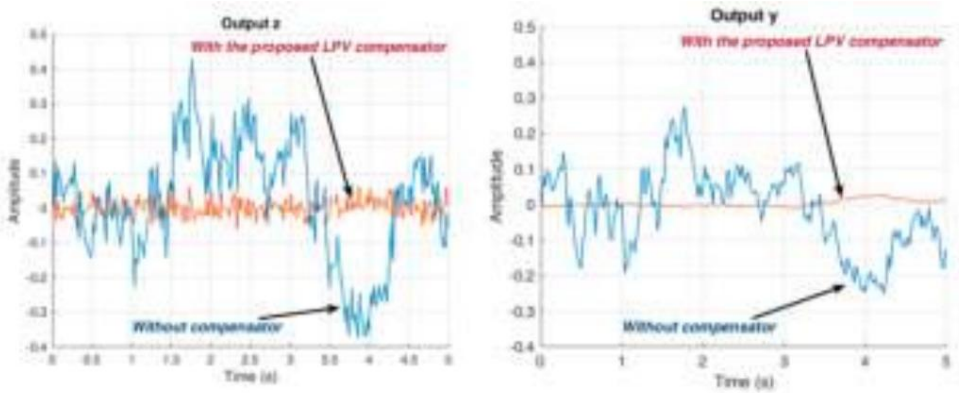


Figure 12. Les sorties z et y pour la perturbation du bruit blanc.

Le système avec compensateur prédictif LPV est comparé au système sans compensateur. Il est à noter que le système doit être un système stable ou stabilisé par un contrôleur de rétroaction. Comme le montrent les résultats des figures 11 et 12, le compensateur dépendant des paramètres est assez efficace, similaire aux résultats de la figure 10. Ainsi, les effets des perturbations externes sont réduits de près de 100 %. Par conséquent, le compensateur anticipatif LPV conçu présente des performances significatives contre les perturbations. Enfin, la conception du compensateur est assez réussie pour le système LPV. En conséquence, le compensateur proposé est tout à fait efficace pour rejeter les perturb

Machine Translated by Google

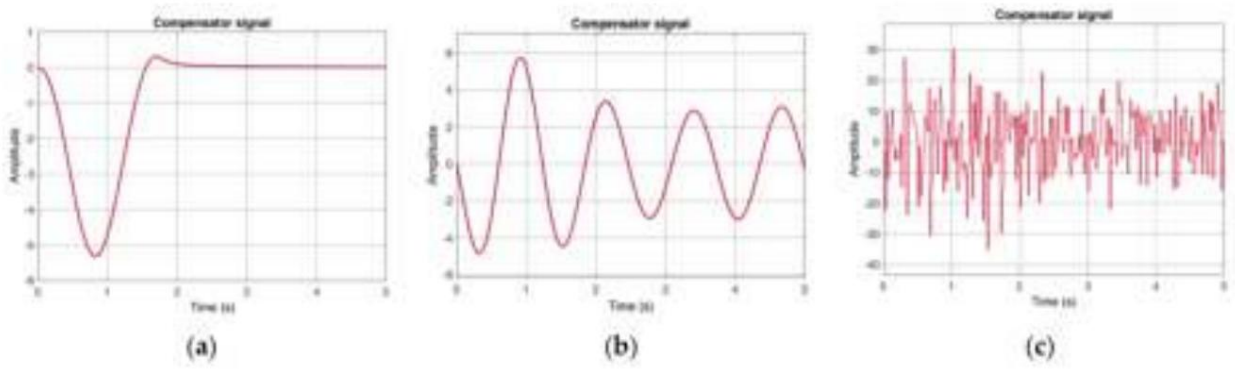


Figure 13. Les signaux de force générés pour : (a) un signal de choc ; (b) un signal sinusoïdal de 5 rad/s ; (c) un signal de bruit blanc.

Dans la conception du compensateur LPV proposé basé sur le LMI dilaté, la matrice de Lyapunov peut être désignée sous la forme LPV, ce qui réduit le conservatisme, sans approches supplémentaires telles que la grille, la procédure s, la multi-convexité dans [11] et les conditions dans [18,19]. Par exemple, de nombreuses conditions LMI existent pour la conception du contrôleur LPV dans [45] puisque des conditions multi-convexités sont utilisées en raison des produits A(α) × P(α) dans (6). La solution proposée est donc plus simple et moins conservatrice. Sinon, des solveurs d'inégalités matricielles bilinéaires (BMI) inefficaces ou des algorithmes LMI itératifs sont nécessaires. Les solutions ne nécessitent aucun algorithme itératif LMI ou BMI.

6. Conclusions et travaux futurs

Cet article se concentre sur un compensateur à action directe contre les perturbations en plus d'un contrôleur de rétroaction d'état pour le système LPV. La matrice de Lyapunov est divisée des matrices du système en injectant une variable réelle slack dans les conceptions basées sur LMI ; ainsi, le PDLM est désigné. Par conséquent, les formulations LMI proposées pour le contrôleur de rétroaction d'état et le compensateur direct sont de dimension finie et ne nécessitent pas de conditions supplémentaires telles que la procédure s, la grille et la multi-convexité, même si le PDLM est utilisé. Ainsi, ils ont une structure plus simple et un caractère conservateur inférieur à celui des conceptions similaires de rétroaction d'état et de rétroaction anticipée. Les résultats numériques du contrôleur à retour d'état montrent que la solution est moins conservatrice et plus simple, même pour de très grandes plages de paramètres. En particulier pour le compensateur, les résultats de simulation montrent que les compensateurs à action directe dépendants et indépendants des paramètres ont des performances significatives contre les perturbations car les effets des perturbations externes sont presque complètement éliminés . Par conséquent, la validité et les avantages des LMI proposés sont obtenus efficacement avec des exemples numériques et de simulation. En conséquence, les solutions LMI proposées sont meilleures pour les systèmes en termes de simplicité et de conservativité.

Pour des études ultérieures, la première d'entre elles peut être considérée comme l'obtention du μ scalaire réel optimal via des méthodes d'optimisation métaheuristiques. La seconde peut concevoir à la fois un contrôle par rétroaction et un compensateur à action directe pour les systèmes instables. Le troisième est la conception de la commutation du compensateur anticipatif LPV via le LMI dilaté. De plus, ce compensateur à action directe proposé avec un compensateur à action directe LPV commuté peut être comparé en ce qui concerne des critères tels que les performances et la complexité.

Contributions de l'auteur : Conceptualisation, M.˙ I. et YA ; méthodologie, M.˙ I. et YA ; logiciel, M.˙ I. et YA ; validation, YA ; analyse formelle, YA ; enquête, M.˙ I. et YA ; ressources, M.˙ I.; conservation de données, M.˙ I.; rédaction – préparation du projet original, M.˙ I. ; rédaction – révision et édition, YA ; visualisation, M.˙ I. et YA ; supervision, YA Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l' article, des demandes complémentaires peuvent être adressées à l'auteur correspondant.

Machine Translated by Google

Conflits d'intérêts : L'auteur Mustafa ˙ Inci était employé par la société Volta Motor Industry and Trade Inc. Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Les références

1. Kim, C. Contrôle de rétroaction de sortie statique H∞ robuste pour les routeurs TCP/AQM basé sur l'optimisation LMI. Électronique 2024, 13, 2165. [Référence croisée]
2. Kim, Y. ; Tran, télé ; Kim, K.-H. Contrôle sans capteur de tension de réseau adaptatif en fréquence basé sur EMPC robuste pour un onduleur connecté au réseau filtré LCL. Électronique 2024, 13, 998. [CrossRef]
3. Németh, Z. ; Kuczmann, M. Contrôleur basé sur l'inégalité à matrice linéaire et conception d'observateur pour machine à induction. Électronique 2022, 11, 3894. [CrossRef]
4. Ndabarushimana, E. ; Qin, N. ; Ma, L. Découplage des perturbations pour un redresseur à modulation de largeur d'impulsion monophasé basé sur un Filtre H-Infinity étendu. Électronique 2023, 12, 2765. [CrossRef]
5. Boyd, S. ; El Ghaoui, L. ; Féron, E. ; Balakrishnan, V. Inégalités matricielles linéaires dans la théorie des systèmes et du contrôle ; Société pour l'industrie et Éditions de mathématiques appliquées (SIAM) : Philadelphie, PA, États-Unis, 1994 ; Tome 15, ISBN0898714850.
6. De Oliveira, MC; Géromel, JC; Bernussou, J. Caractérisations étendues des normes H2 et H et paramétrages du contrôleur pour Systèmes à temps discret. Int. J. Contrôle 2002, 75, 666-679. [Référence croisée]
7. Bara, GI Analyse robuste et contrôle des systèmes de descripteurs incertains dépendants des paramètres. Système. Contrôle Lett. 2011, 60, 356-364. [Référence croisée]
8. Cao, Y.-Y.; Lin, Z. Une approche système de descripteurs pour une analyse de stabilité robuste et une synthèse de contrôleur. IEEETrans. Automatique. Contrôle 2004, 49, 2081-2084. [Référence croisée]
9. De Caigny, J. ; Camino, JF; Oliveira, RCLF; Pères, PLD ; Swevers, J. Contrôle H2 et H∞ programmés par gain du temps discret Systèmes polytopiques à variation temporelle. Application de la théorie du contrôle IET. 2010, 4, 362-380. [Référence croisée]
10. Oliveira, MCD; Géromel, JC; Bernussou, J. Une approche d'optimisation LMI pour la conception de contrôleurs multiobjectifs\npour les systèmes à temps discret . Dans Actes de la 38e Conférence IEEE sur la décision et le contrôle (Cat. No. 99CH36304), Phoenix, AZ, États-Unis, 7-10 décembre 1999 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 1999 ; Volume 4, pages 3611 à 3616.
11. Gahinet, P. ; Apkarian, P. ; Chilali, M. Fonctions Affine de Lyapunov dépendantes des paramètres et incertitude paramétrique réelle. IEEE Trans. Automate. Contrôle 1996, 41, 436-442. [Référence croisée]
12. Pipeleers, G. ; Demeulenaère, B. ; Swevers, J. ; Vandenberghe, L. Systèmes et lettres de contrôle Caractérisations LMI étendues pour Stabilité et performances des systèmes linéaires. Système. Contrôle Lett. 2009, 58, 510-518. [Référence croisée]
13. Ku, C.-C. ; Chen, G.-W. Conception de contrôleur à gain programmé pour les systèmes à paramètres linéaires à temps discret variant avec multiplicatif Des bruits. Int. J. Contrôle automatique. Système. 2015, 13, 1382-1390. [Référence croisée]
14. Becker, G. ; Packard, A. Performances robustes des systèmes linéaires à variation paramétrique utilisant une rétroaction linéaire paramétriquement dépendante . Système. Contrôle Lett. 1994, 23, 205-215. [Référence croisée]
15. Féron, E. ; Apkarian, P. ; Gahinet, P. S-Procédure pour l'analyse des systèmes de contrôle avec incertitudes paramétriques via des fonctions de Lyapunov dépendant des paramètres. Dans Actes de l'American Control Conference de 1995, Seattle, WA, États-Unis, 21-23 juin 1995 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 1995 ; Volume 1, pp. 968-972.
16. Wei, X. ; Verhaegen, M. Solutions LMI pour la conception d'observateurs de détection de défauts mixtes H-/H∞ pour la variation de paramètres linéaires Systèmes. Int. J.Adapter. Processus de signal de contrôle. 2011, 25, 114-136. [Référence croisée]
17. Lim, S. Analyse et contrôle des systèmes à paramètres linéaires variables ; Université de Stanford : Stanford, Californie, États-Unis, 1999 ; ISBN0599241535.
18. Oliveira, RCLF; Peres, LMI dépendant des paramètres PLD dans une analyse robuste : caractérisation de solutions polynomiales dépendantes des paramètres via des relaxations LMI. IEEETrans. Automatique. Contrôle 2007, 52, 1334-1340. [Référence croisée]
19. Ebihara, Y. ; Peaucelle, D. ; Arzelier, D. Approche S-Variable du contrôle robuste basé sur l'IMT ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2015 ; ISBN978-1-4471-6605-4.
20. Ebihara, Y. ; Hagiwara, T. Nouvelles caractérisations LMI dilatées pour la synthèse de contrôleurs multiobjectifs en temps continu. Automatique 2004, 40, 2003-2009. [Référence croisée]
21. Chanson, L. ; Yang, J. Une approche améliorée de l'analyse de stabilité robuste et de la synthèse de contrôleurs pour les systèmes LPV. Int. J. Robuste Contrôle non linéaire 2010, 21, 1574-1586. [Référence croisée]
22. Apkarian, P. ; Tuan, HD ; Bernussou, J. Analyse en temps continu, attribution de structure propre et synthèse H2 avec caractérisations améliorées des inégalités matricielles linéaires (LMI). IEEETrans. Automatique. Contrôle 2001, 46, 1941-1946. [Référence croisée]
23. Ebihara, Y. ; Hagiwara, T. Une approche LMI dilatée pour une analyse robuste des performances des systèmes incertains linéaires invariants dans le temps. Automatique 2005, 41, 1933-1941. [Référence croisée]
24. Trofino, A. ; Coutinho, DF; Barbosa, KA Amélioration des conditions H2 et H∞ pour une analyse robuste et une synthèse de contrôle des systèmes linéaires. Contrôle Autom. 2005, 16, 427-434. [Référence croisée]
25. Shaked, U. Représentations LMI améliorées pour l'analyse et la conception de systèmes à temps continu de type polytopique Incertitude. IEEETrans. Automatique. Contrôle 2001, 46, 652-656. [Référence croisée]
26. Wei, J. ; Lee, L. Amélioration supplémentaire des représentations LMI pour l'analyse et la conception de systèmes à temps continu avec incertitude de type polytopique 1. Dans les actes de la 5e Conférence asiatique de contrôle de 2004 (IEEE Cat. No. 04EX904), Melbourne, VIC, Australie, 20 –23 juillet 2004 ; Volume 2, p. 1 à 7.

Machine Translated by Google

27. Sajjadi-Kia, S. ; Jabbari, F. Sur la dilatation des inégalités de matrice réelle limitée. Int. J. Contrôle 2012, 85, 1593-1601. [Référence croisée]
28. Xie, W. Une représentation LMI équivalente du lemme réel borné pour les systèmes à temps continu. J. Inégalités Appl. 2008, 2008, 672905. [Réf. croisée]
29. Dabboussi, K. ; Zrida, J. Une approche LMI dilatée pour la synthèse robuste d'un contrôleur de rétroaction d'état statique H∞ . Dans Actes de la 16e Conférence internationale de l'IEEE 2009 sur l'électronique, les circuits et les systèmes — (ICECS 2009), Yasmine Hammamet, Tunisie, 13-16 décembre 2009 ; pp. 491-494.
30. Rodrigues, Louisiane ; Oliveira, RCLF; Camino, JF LMI paramétrées pour un contrôle robuste et par rétroaction d'état des systèmes polytopiques en temps continu . Int. J. Contrôle non linéaire robuste 2018, 28, 940–952. [Référence croisée]
31. Hu, C. ; Jaimoukha, IM Nouvelle procédure itérative basée sur l'inégalité matricielle linéaire pour le contrôle par rétroaction d'état H2 et H∞ des systèmes polytopiques en temps continu. Int. J. Contrôle non linéaire robuste 2021, 31, 51–68. [Référence croisée]
32. Guzmán, JL; Hägglund, T. Règles de réglage pour le contrôle anticipatif à partir de perturbations mesurables combinées au contrôle PID : Une critique. Int. J. Contrôle 2021, 97, 2-15. [Référence croisée]
33. Zhu, W. ; Zhang, Z. ; Chen, J. ; Zhao, S. ; Huang, S. Réconciliation dynamique des données pour améliorer les performances des systèmes de contrôle feedback/feedback avec bruit de mesure. J. Contrôle des processus 2021, 108, 12-24. [Référence croisée]
34. García-Mañas, F. ; Guzman, JL; Rodríguez, F. ; Bérenguel, M. ; Hägglund, T. Évaluation expérimentale des règles de réglage Feedforward. Contrôle Ing. Entraînez-vous. 2021, 114, 104877. [Réf. croisée]
35. Du, Y. ; Cao, W. ; Elle, J. ; Wu, M. ; Fang, M. Rejet des perturbations via une compensation anticipée utilisant une approche améliorée de perturbation d'entrée équivalente. J. Frankl. Inst. 2020, 357, 10977-10996. [Référence croisée]
36. Huang, M. ; Deng, Y. ; Li, H. ; Wang, J. Atténuation de l'ondulation de couple du PMSM à l'aide d'un système robuste amélioré à deux degrés de liberté Contrôleur via l'observateur de paramètres en mode coulissant étendu. ISA Trans. 2022, 129, 558-571. [Référence croisée]
37. Adam, EJ; Marchetti, JL Conception et réglage de contrôleurs à action directe robustes. Calculer. Chimique. Ing. 2004, 28, 1899-1911. [Référence croisée]
38. Peng, C. ; Xu, H. ; Zhang, J. Conception de contrôle à deux degrés de liberté avec représentation H∞ LMI améliorée. J. Inégalités Appl. 2012, 2012, 147. [Référence croisée]
39. Köse, IE ; Scherer, CW Contrôle anticipatif robuste L2-Gain de systèmes incertains utilisant des IQC dynamiques. Int. J. Contrôle non linéaire robuste 2009, 19, 1224-1247. [Référence croisée]
40. Alma, M. ; Martinez, JJ; Landau, pièce d'identité ; Buche, G. Conception et réglage de compensateurs à action directe H-Infinity d'ordre réduit pour Contrôle actif des vibrations. IEEETrans. Système de contrôle. Technologie. 2012, 20, 554-561. [Référence croisée]
41. Peng, C. ; Zhang, Z. ; Zou, J. ; Li, K. ; Zhang, J. Contrôle robuste d'inversion et de rétroaction 2DOF basé sur un modèle interne pour le système LPV avec perturbation. J. Contrôle des processus 2013, 23, 1415-1425. [Référence croisée]
42. Yuan, C. ; Wu, F. Contrôle anticipatif commuté robuste H2 et H∞ des systèmes LFT incertains. Int. J. Contrôle non linéaire robuste 2016, 26, 1841-1856. [Référence croisée]
43. Fleps-Dezasse, M. ; Bünte, T. ; Svaricek, F. ; Brembeck, J. Contrôle anticipé LPV des suspensions semi-actives pour une meilleure stabilité au roulis. Contrôle Ing. Entraînez-vous. 2018, 78, 1-11. [Référence croisée]
44. Altun, Y. ; Gulez, K. ; Mumcu, Synthèse de contrôleur à action directe LPV statique TV pour les systèmes à paramètres linéaires variables. Dans Actes de la 9e Conférence asiatique de contrôle (ASCC) 2013, Istanbul, Turquie, 23-26 juin 2013 ; IEEE : Piscataway, New Jersey, États-Unis, 2013 ; p. 1 à 4.
45. Altun, Y. ; Gulez, K. Synthèse de contrôle anticipatif variable à paramètres linéaires à l'aide de la fonction Lyapunov dépendante des paramètres. Dynamique non linéaire. 2014, 78, 2293-2307. [Référence croisée]
46. Venkataraman, R. ; Seiler, P. Synthèse LPV convexe d'estimateurs et de rétroactions utilisant la dualité et la quadratique intégrale Contraintes. Int. J. Contrôle non linéaire robuste 2018, 28, 953-975. [Référence croisée]
47. Löfberg, J. Programmation convexe robuste automatique. Optimale. Logiciel de méthodes. 2012, 27, 115-129. [Référence croisée]
48. Labit, Y. ; Peaucelle, D. ; Henrion, D. SEDUMI INTERFACE 1.02 : Un outil pour résoudre les problèmes d'IMT avec SEDUMI. Dans Actes du Symposium international IEEE 2002 sur la conception de systèmes de contrôle assistés par ordinateur, CACSD 2002 — Actes, Glasgow, Royaume-Uni, 20 septembre 2002 ; pp. 272-277.
49. Gahinet, P. ; Nemirovskii, A. ; Laub, AJ; Chilali, M. Boîte à outils de contrôle LMI. Dans Actes de la 33e Conférence IEEE de 1994 sur la décision et le contrôle, Lake Buena Vista, FL, États-Unis, 14-16 décembre 1994 ; The Mathworks, Inc. : Natick, MA, États-Unis, 1995 ; p. 4-13.
50. Apkarian, P. ; Adams, RJ Techniques avancées de planification des gains pour les systèmes incertains. IEEETrans. Système de contrôle. Technologie. 1998, 6, 21-32. [Référence croisée]
51. Chen, H. ; Guo, KH Contrôle H∞ contraint des suspensions actives : une approche LMI. IEEETrans. Contrôle. Système. Technologie. 2005, 13, 412-421. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Un pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité

Xinyu Xu, Qiyue Zhuo, Chunhui Jiang, Zichao Zhou, Junlong Tang et Wanghui Zou *

École des sciences physiques et électroniques, Université des sciences et technologies de Changsha, Changsha 410114, Chine
* Correspondance : zouwh@csust.edu.cn

Résumé : Un système adaptatif de pilote de rétroéclairage à diodes électroluminescentes (DEL) à haut rendement a été proposé pour résoudre le problème de la perte de puissance supplémentaire causée par la variation de tension directe des LED. Dans ce schéma, le courant de crête et le cycle de service de chaque canal LED sont ajustés séparément via un algorithme de contrôle adaptatif pour minimiser la chute de tension sur le régulateur de courant linéaire (LCR) de chaque canal LED afin de réduire la perte de puissance excessive dans chaque canal LED. et améliorer l' efficacité énergétique totale . Un régulateur de courant linéaire, adapté au contrôle adaptatif, est conçu sur un processus CMOS (complémentaire métal-oxyde-semi-conducteur) de 0,18 µm 5 V. Les résultats de simulation démontrent que le régulateur de courant linéaire peut atteindre un courant de canal réglable linéairement allant de 0 à 48 mA avec une résolution de courant de 0,2 mA. Dans différents coins de processus et températures, l' erreur maximale pour toute la plage de courant est inférieure à 0,1 %. La zone centrale de la disposition des puces est d'environ 0,1 mm2. Le prototype complet du pilote comprend les puces LCR, les transistors MOS de puissance externe, le module numérique et les chaînes de LED. Les résultats des tests montrent que la perte de puissance du régulateur de courant linéaire a été considérablement réduite et que l'efficacité énergétique de chaque canal LED a été mesurée à environ 98,1 %.

Mots-clés : pilote de rétroéclairage LED ; contrôle adaptatif ; régulation de courant linéaire ; haute efficacité

check for updates

Citation : Xu, X. ; Zhuo, Q. ; Jiang, C. ; Zhou, Z. ; Tang, J. ; Zou, W. Un pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité. Électronique 2024, 13, 3057. https://doi.org/10.3390/électronique13153057

Rédacteur académique : Francesco Driussi

Reçu : 22 juin 2024
Révisé : 25 juillet 2024
Accepté : 30 juillet 2024
Publié : 2 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Les diodes électroluminescentes (DEL) ont été largement adoptées comme sources de rétroéclairage pour les dispositifs d'affichage à cristaux liquides (LCD) et d'autres applications. Par rapport aux sources lumineuses traditionnelles, les LED offrent des avantages significatifs tels qu'un rendement élevé, une excellente stabilité des couleurs, une fiabilité élevée, une longue durée de vie, une taille compacte et une sécurité environnementale [1–4]. Étant donné que la luminosité de la LED est proportionnelle à son courant, un circuit pilote efficace et précis est essentiel dans les applications de rétroéclairage LED pour obtenir un contrôle précis de la luminosité. De plus, des canaux LED parallèles (chaînes LED) sont toujours utilisés pour garantir une couverture suffisante [5,6]. Un pilote de rétroéclairage LED traditionnel est principalement composé d'un convertisseur élévateur, de canaux LED parallèles et de régulateurs de courant linéaires (LCR) correspondants. Le convertisseur élévateur fournit une tension suffisante pour allumer toutes les LED de chaque canal, et le LCR régule le courant de chaque canal pour contrôler la luminosité [7–9]. En tant que domaine important d' application de la gestion de l'énergie, la conception de pilotes de rétroéclairage LED a toujours été un sujet de recherche populaire pour de nombreuses universités et instituts de recherche à travers le monde. L'objectif est d'optimiser les performances du système grâce à des conceptions de circuits et des architectures système innovantes, en mettant l'accent sur des mesures telles que l'efficacité du système [10-15], le taux de gradation [16-20] et la précision du courant [21-25].

En raison des variations de processus, des effets de vieillissement et des changements de température, les LED du même type peuvent présenter des tensions directes différentes, ce qui entraîne des écarts de tension importants entre les différents canaux de LED. Par conséquent, il est nécessaire d’introduire une certaine marge de tension pour garantir un fonctionnement correct dans diverses conditions de trav Cependant, cela entraîne également une perte de puissance accrue et une détérioration de l’ efficacité énergétique [26,27]. Un mécanisme de contrôle numérique basé sur un R-DAC a été proposé dans [28] pour résoudre le problème de la perte de puissance accrue due à une tension excessive. Une comparaison entre la tension

Machine Translated by Google

sur le LCR et une tension de référence prédéfinie est appliquée, ce qui entraîne l'ajustement de la tension de rétroaction du convertisseur élévateur DC-DC via un convertisseur numérique-analogique (DAC). La sortie du convertisseur élévateur est ensuite ajustée pour maintenir la tension LCR à un niveau fixe. Dans [29], une technique de suivi de référence adaptative a été proposée, utilisant un circuit de « tension minimale » et une résistance réglable sur 3 bits comme résistance de rétroaction pour ajuster la sortie du convertisseur élévateur. La précision de la tension de sortie est influencée par la précision et la plage de réglage de la résistance. Dans [30–34], via le « Sélecteur de tension minimale » ou le « Sélecteur de canal le plus bas », la tension LCR minimale entre les canaux est détectée et utilisée pour ajuster dynamiquement le rapport cyclique du signal de commutation du convertisseur élévateur et modifier la sortie du convertisseur élévateur. Dans [35,36], des diodes sont utilisées pour sélectionner la tension LCR minimale, une méthode qui n'est pas facilement implémentée dans les processus CMOS standard. Dans [2], les avantages et les inconvénients de diverses topologies de pilotes de LED ont été analysés et des orientations de recherche futures ont été identifiées.

En général, pour la plupart des solutions existantes, la stratégie principale consiste à ajuster la tension de sortie du convertisseur élévateur pour réduire la tension excessive sur le LCR, réduisant ainsi les pertes et améliorant l'efficacité. Cependant, pour une configuration multicanal, en raison des différences entre canaux, il est plus efficace d'optimiser chaque canal séparément afin de réduire davantage les pertes et d'améliorer l'efficacité. Dans cet article, nous proposons un schéma de pilotage adaptatif du rétroéclairage LED à haut rendement qui aborde le problème des différences entre canaux. La régulation linéaire du courant et la modulation de largeur d'impulsion (PWM) sont utilisées pour chaque canal. Grâce à la régulation linéaire du courant, le courant du canal est ajusté et la tension sur le LCR dans chaque canal est minimisée à une valeur fixe prédéfinie. Ensuite, grâce à la modulation de largeur d'impulsion, le rapport cyclique du courant de canal est ajusté, calibrant le courant moyen de chaque canal au même niveau. Cette stratégie garantit que chaque canal LED fonctionne avec une perte minimale, maximisant ainsi l'efficacité.

La structure des parties restantes de cet article est la suivante : La section 2 développe la technologie de contrôle adaptatif conçue dans cet article. La section 3 discute et analyse les résultats de simulation et les résultats des tests du pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité proposé. La section 4 conclut l'article.

2. Technique de contrôle adaptatif

2.1. Principe du contrôle adaptatif

La figure 1 illustre la structure du pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité proposé, qui comprend un contrôleur de luminosité, un convertisseur élévateur et plusieurs canaux LED. Chaque canal LED se compose d'une chaîne LED, d'un LCR et d'un transistor MOS haute tension agissant comme un interrupteur pour le contrôle du rapport cyclique. Le contrôleur de luminosité comprend un R-DAC 9 bits pour produire du VC, qui sert de référence de tension et détermine la sortie du convertisseur boost Vboost. Le signal SENSE indique si le LCR est dans le bon état. Le contrôleur de luminosité surveille le SENSE de chaque canal et génère des signaux VC, PWM et CM_SW selon un algorithme et des étapes spécifiques. CM_SW et PWM sont des signaux numériques multibits qui contrôlent respectivement le courant de crête et le rapport cyclique du canal. Ce processus garantit que chaque canal LED fonctionne à un état de haute efficacité.

D'après la figure, pour le canal n, il existe une relation de tension telle que

$$Vboost = VLED,n + VMP,n + VLCR,n \quad (1)$$

où VLED est la tension aux bornes de la chaîne de LED ou la somme de la tension directe de chaque LED. VMP est la tension source-drain du transistor MOS haute tension MP, et VLCR désigne la tension LCR. Le « n » en indice indique le canal n, qui s'applique à tous les symboles de cet article. Si le contrôle adaptatif est désactivé et que le canal LED n'est pas dans l'état optimal, il y aura une portion excessive de la tension LCR, qui peut être exprimée comme suit :

$$VLCR,n = VLCR_min + VLCR_exc,n \quad (2)$$

Machine Translated by Google

$$= + \quad (2)$$

où VLCR_min est la tension LCR minimale requise pour assurer un bon fonctionnement, c'est-à-dire où VLCR_min est la tension LCR minimale requise pour assurer un bon fonctionnement, c'est-à-dire que le transistor de sortie du LCR fonctionne correctement et maintient une sortie précise, c'est-à-dire que le transistor de sortie du LCR fonctionne correctement et maintient une sortie précise et VLCR_exc représente la partie excédentaire de la tension LCR. Pour un canal, le courant. VLCR_exc représente la partie excédentaire de la tension LCR. Pour un canal, le courant. La perte de puissance peut être calculée par la perte de puissance peut être calculée par

$$= = \quad (3)$$

$$P_{loss,n} = I_{ave,n} \times V_{loss,n} = I_{ave,n} \times (V_{LCR,n} + V_{MP,n})$$

où Iave,n est le courant moyen, qui est déterminé par le courant de crête Ipeak,n et où Iave,n est le courant moyen, qui est déterminé par le courant de crête Ipeak,n et le rapport cyclique actuel δn. Vloss,n est la somme de VLCR,n et VMP,n. Si les résistances à l'état passant du rapport cyclique actuel δn. Vloss,n est la somme de VLCR,n et VMP,n. Si les résistances à l'état passant de les transistors MOS haute tension sont suffisamment faibles, VMP a un impact limité sur Ploss. Parce que les transistors MOS haute tension sont suffisamment faibles, VMP a un impact limité sur Ploss. Parce que VMP et VLCR_min sont des conditions préalables pour maintenir le fonctionnement approprié du MOS et du LCR, le VMP et VLCR_min sont des conditions préalables pour maintenir le fonctionnement approprié du MOS et du LCR, une perte de puissance excessive est définie comme la perte de puissance excessive est définie comme

$$= \quad (4)$$

$$P_{loss_exc,n} = I_{ave,n} \times V_{LCR_exc,n}$$

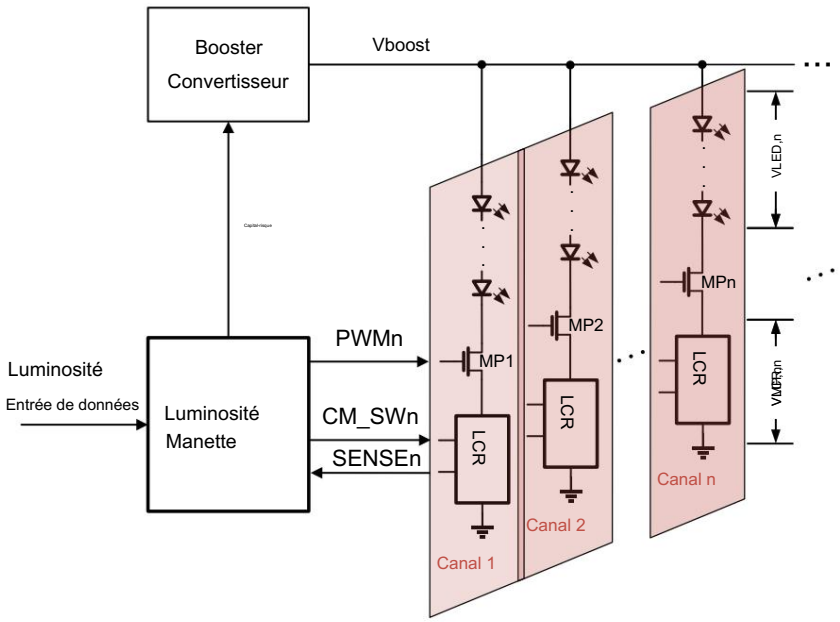


Figure 1. Structure du pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité proposé. Figure 1. Structure du pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haute efficacité proposé.

2.2. Processus de contrôle adaptatif 2.2. Processus de contrôle adaptatif

Un processus de contrôle adaptatif adapté aux pilotes de LED multicanaux est conçu pour réduire la perte de puissance excessive causée par une tension excessive. Au démarrage du système, le contrôleur de luminosité lance un processus d'initialisation, au cours duquel le courant de crête et le rapport cyclique de chaque canal LED sont réglés individuellement pour obtenir une luminosité uniforme et minimiser simultanément les pertes de puissance excessives. Après la phase d'initialisation, le contrôleur de luminosité passe à la phase de suivi, où il surveille en permanence l'état du LCR. Les paramètres de courant de crête et de cycle de service sont ensuite ajustés en conséquence pour s'adapter aux fluctuations de l'alimentation électrique, de la température et d'autres facteurs.

La figure 2 montre l'organigramme de la phase d'initialisation. Premièrement, les données d'entrée de luminosité, y compris le courant de crête nominal Iset et le rapport cyclique δset, sont chargées dans le contrôleur de luminosité. Ensuite, le courant LCR de chaque canal est réglé sur Iset via le signal CM_SW. Le contrôleur de luminosité commence alors à augmenter VC, provoquant l' activation de Vboost . Signal CM_SW. Le contrôleur de luminosité commence alors à augmenter VC, entraînant une diminution de Vboost en conséquence. Pendant ce temps, le contrôleur de luminosité surveille simultanément la plier en conséquence. Pendant ce temps, le contrôleur de luminosité surveille simultanément le signal d'état SENSE de chaque canal. Une fois que tous les signaux SENSE passent de 0 à 1, le tu signales SENSE de chaque canal. Une fois que tous les signaux SENSE passent de 0 à 1, l'augmentation de VC s'arrête. À ce stade, les courants de crête de tous les canaux ont atteint la valeur prédéfinie. augmentation des arrêts VC . À ce stade, les courants de crête de tous les canaux ont atteint la valeur prédéfinie de Iset, et il y a toujours un canal, supposé être le canal k, dont le SENSE le signal est le dernier à changer.

Machine Translated by Google

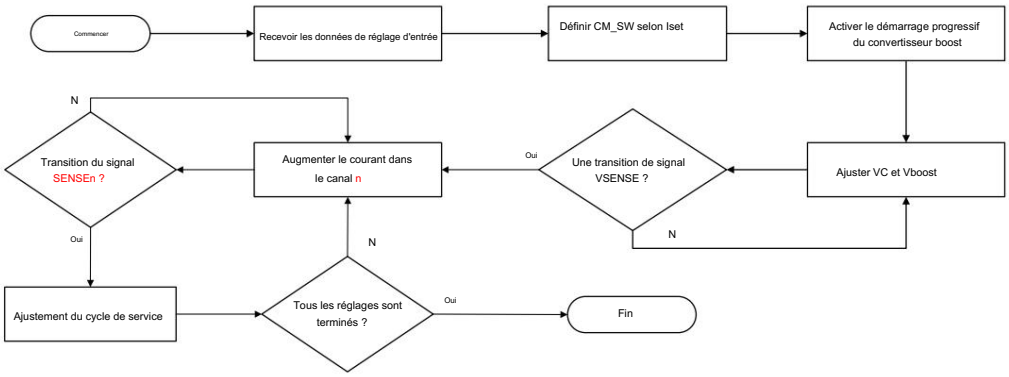


Figure 2. Organigramme du processus de contrôle adaptatif dans la phase d'initialisation.

Ensuite, une étape d'ajustement du courant de crête est effectuée séquentiellement sur toutes les voies sauf la voie k. Le contrôleur de luminosité tente d'augmenter le courant du canal en fournissant un nouveau paramètre CM_SW. Si SENSE reste à 1, le contrôleur de luminosité continue ce processus. Cependant, si SENSE passe de 1 à 0, le contrôleur de luminosité revient au paramètre CM_SW précédent, concluant ainsi le processus de réglage pour ce canal. La voie correspondante présente alors un nouveau courant de crête. Le contrôleur de luminosité procède au processus de réglage pour le canal suivant. Une fois tous les ajustements de courant terminés, la tension sur chaque LCR se rapproche de VLCR_min et la composante excédentaire a été minimisée.

Enfin, afin de garantir la même luminosité, chaque canal LED doit avoir le même courant moyen. Par conséquent, le rapport cyclique du canal n (δn) est ajusté par le contrôleur de luminosité comme suit :

$$\delta n = \delta set \times \frac{Iset}{Je\ parle,\ n} \quad (5)$$

où Ipeak,n est le courant de crête du n-ème canal LED après le processus de réglage décrit ci-dessus. δset et Iset représentent respectivement le cycle de service initial et le courant de crête. Il convient de noter que, selon l'équation (4), le courant moyen reste inchangé.

Grâce au processus susmentionné, le courant de crête Ipeak,n et le rapport cyclique δn pour chaque canal de LED sont ajustés, minimisant ainsi la consommation d'énergie supplémentaire résultant d'une tension excessive. Le courant moyen ajusté s'aligne étroitement sur le courant moyen initialement défini. Étant donné que la luminosité des LED est directement corrélée à leur courant, la méthode de contrôle adaptatif garantit que les niveaux de luminosité sur tous les canaux LED restent cohérents. Dès l'entrée dans la phase de suivi, le principe général ressemble à celui de la phase d'initialisation. Les deux combinent l'ajustement du courant de crête et du rapport cyclique et ne seront pas décrits en détail dans cet article.

2.3. Régulateur de courant linéaire

Étant donné que la luminosité des LED est directement influencée par leur courant, un contrôle précis de la luminosité nécessite une régulation précise du courant. Dans de nombreuses solutions de pilotes de rétroéclairage LED, un LCR est généralement utilisé pour générer et contrôler le courant LED. La figure 3 illustre deux configurations typiques de circuit LCR [37]. Un objectif clé de la conception des circuits LCR est d'obtenir une précision de courant élevée. Sur la figure 3a, l'amplificateur opérationnel et le transistor M1 forment une rétroaction négative, garantissant que VS est égal à VREF. Par conséquent, le courant de sortie ILED est VREF/RS. De toute évidence, la précision de RS affecte directement la précision d'ILED . Il est important de noter que les courants de pilotage des LED de rétroéclairage sont généralement importants. Dans cet article, le courant de commande maximum est conçu pour être de 48 mA. De plus, pour minimiser la perte de puissance, VS ou VREF doivent être maintenus aussi bas que possible, ce qui nécessite un petit RS pour obtenir des courants élevés. Cependant, un RS trop petit peut améliorer considérablement l'impact négatif des parasites du circuit sur la précision du courant de sortie.

Machine Translated by Google

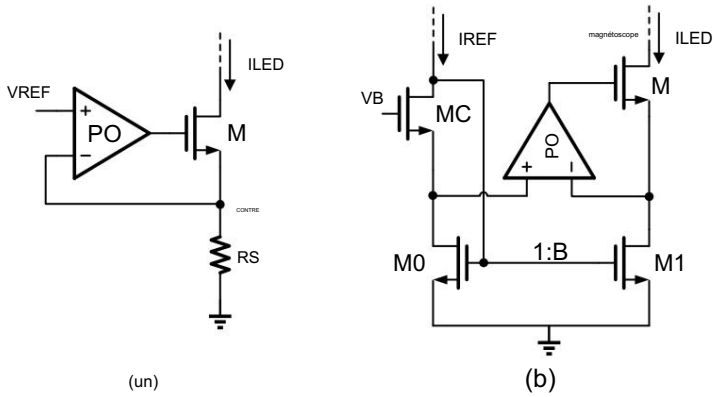


Figure 3. Circuits typiques du régulateur de courant linéaire. a) Structure de régulation à la source ; (b) Miroir structure actuelle.

La figure 3b représente un autre type de LCR. Dans cette configuration, le courant de sortie ILED n'est pas généré directement comme sur la figure 3a, mais via la mise en miroir du courant. Dans cette structure, ILED est déterminé par B × IREF, où IREF est un courant de référence et B est le rapport miroir de courant, défini par le rapport de taille du transistor M1 à M0. L'amplificateur opérationnel (OP) joue un rôle crucial en garantissant que les transistors M1 et M0 ont le même VDS, garantissant ainsi une miroir précise du courant.

En fait, M0 et M1 peuvent fonctionner dans la région linéaire au lieu de la région de saturation en abaissant VB, réduisant ainsi VDS, ce qui contribue à abaisser VLCR et à réduire la puissance excessive [38]. L'expression classique du courant de drain pour les transistors MOS fonctionnant dans la région linéaire est

$$C_{je}\ (\ )(2(V_{VuS}X(\ )(2(V_{GS} - V_{TH}) - V_{DS}]V_{DS} \quad I_D = 1\ W\ 2\ L \tag{6}$$

Le transistor peut maintenant être approximativement équivalent à une résistance linéaire. Comme mentionné ci-dessus, en raison de l'effet de OP, les VDS de M0 et M1 restent identiques. Alors le courant de drain de M0 et M1 a une relation comme ff

$$\frac{I_{D,\,M0}}{I_{D,\,M1}} = \frac{(W/L)_{M0}}{(W/L)_{M1}} = \frac{1}{B} \tag{7}$$

toute évidence, une mise en miroir précise du courant est garantie.

Sur la base de la structure du circuit illustrée sur la figure 3b, un LCR amélioré pour le contrôle adaptatif a été conçu comme illustré sur la figure 4. La principale différence par rapport au circuit de la figure 3b réside dans l'introduction de l'amplificateur opérationnel OP2. OP2, en conjonction avec le transistor M0, forme une boucle de rétroaction négative garantissant que la tension source-drain VDS de M0, notée VA sur la figure, reste égale à VREF. En ajustant VREF, la tension source-drain VDS de M0 peut être contrôlée avec précision. L'avantage de cette conception est qu'elle atténue l'impact des variations du processus et facilite un contrôle précis des paramètres.

Lorsque VREF est bas, le transistor M0 fonctionne dans la région linéaire. Transistors M1, M2, . . ., MN servent de transistors miroir de courant correspondant à M0, chacun ayant la même taille. Le décodeur détermine si chaque transistor miroir est activé ou désactivé sur la base du mot de commande binaire CM_SW, ajustant ainsi le courant de sortie total. Lorsque la grille d'un transistor miroir est connectée à VCOM, elle devient passante ; lorsqu'il est connecté à la terre, il s'éteint.

OP1 fonctionne de manière similaire à OP sur la figure 3b, garantissant que la tension au nœud D (notée VD) correspond à VA, maintenant ainsi une mise en miroir précise du courant. Le comparateur COMP fonctionne comme un simple détecteur d'état de circuit avec VCOM réglé sur 2,5 V dans cette conception. OP1 est un amplificateur opérationnel à gain élevé avec une structure de sortie augmentant le gain [39], tandis que OP2 est un amplificateur opérationnel avec un étage de sortie rail-à-queue de classe AB [40].

Machine Translated by Google

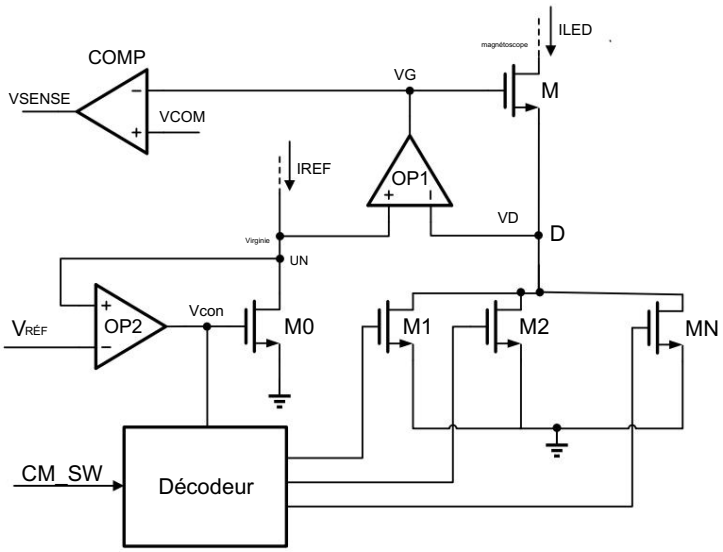


Figure 4. Circuit LCR pour contrôle adaptatif.

Lorsque Vboost est suffisamment élevé, même après avoir pris en compte la chute de tension aux bornes de la chaîne LED, il reste suffisamment de VLCR pour assurer le bon fonctionnement du LCR, permettant à l'ILED d'atteindre ou de maintenir sa valeur définie. Dans cette condition, la tension de grille du transistor MR est d'environ 1,86 V (VGS, MR + VREF) selon les résultats de simulation au coin typique du processus, et SENSE reste à 1. Si Vboost diminue ou si ILED augmente et effectue le transfert direct. La tension de la chaîne LED augmente, le VLCR diminuera en conséquence.

Cependant, tant que le transistor MR reste efficace, le LCR peut continuer à fonctionner normalement. Si VLCR diminue encore et pousse le transistor MR dans une région linéaire profonde, VG doit être augmenté pour contrecarrer les impacts de la diminution du VLCR. Lorsque VG dépasse VCOM, la sortie du comparateur change d'état et SENSE passe à 0. Cela indique que le LCR peut ne plus être en mesure de maintenir ou d'atteindre l' ILED défini.

Tous les transistors miroir ont la même taille et chaque transistor a un rapport de taille de B:1. avec M0. Le courant LED peut être déterminé par l'équation suivante :

$$ILED = N \times B \times IREF \quad (8)$$

où N est le nombre de transistors miroir activés et déterminé par CM_SW. IREF est le courant de référence généré par le circuit de polarisation externe. Il convient de noter que le

Le courant de sortie ILED du LCR forme en fait le courant de crête Ipeak susmentionné.

Même sur la même puce, il existe un certain degré de variation du processus, qui affecte principalement la taille du dispositif et les paramètres caractéristiques, conduisant à des imprécisions ou à des discordances dans la mise en miroir actuelle. Compte tenu de l'influence du rapport largeur/ longueur (W/L) et de la tension de seuil (Vth), le changement de courant provoqué par la variation du processus peut être (WL) exprimé comme suit :

$$\Delta Vth\ \frac{\partial(W/L)}{\partial Vth}\ \Delta(W/L) + \Delta I = \frac{\partial Je}{} \quad (9)$$

Le décalage de courant est généralement défini comme le taux de variation du courant. En supposant aucune corrélation entre les différents facteurs d'influence, elle peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{\Delta Je}{je} = \frac{1}{je}\ \frac{\partial Je}{}\ \Delta(W/L) + \Delta Vth\ \frac{\partial Je}{\partial(W/L)}\frac{}{\partial Vth} \quad (dix)$$

Si le transistor fonctionne dans la zone de saturation, selon le drain correspondant formule actuelle, l'inadéquation actuelle est

$$\frac{\Delta Je}{je} = \frac{\Delta(W/L)}{(W/L)} + \frac{2\Delta Vième}{(VGS - Vème)} \quad (11)$$

Machine Translated by Google

Alors que si le transistor fonctionne dans la région linéaire, selon la formule du courant de drain correspondante, la disparité de courant devient

$$\frac{\Delta Je}{je} = \frac{\Delta(W/L)}{(W/L)} + \frac{2\Delta Vième}{2(VGS - Vth) - VDS} \quad (12)$$

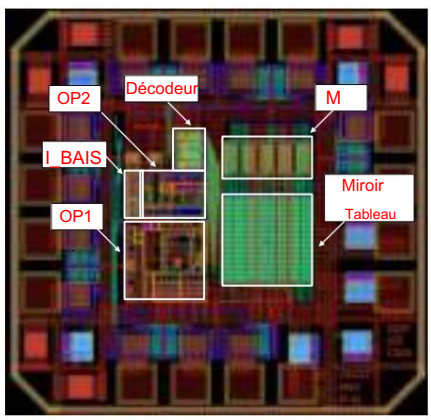
En comparant les deux formules ci-dessus, on peut voir que l'impact de la variation de taille sur l'inadéquation du courant est le même dans les régions linéaires et de saturation. Cependant, l'impact de la variation de tension de seuil est plus faible dans la région linéaire, ce qui indique qu'il est possible d'obtenir une inadéquation de courant plus faible dans la région linéaire.

3. Résultats de simulation et de mesure

3.1. Conception du système et

de la puce Basé sur la figure 2, cet article construit et valide un pilote de LED adaptatif à trois canaux , chaque canal comprenant 6 LED. Une puce de convertisseur élévateur, en particulier le TPS61046 de Texas Instruments, est utilisée. Le LCR est conçu à l'aide d'un procédé CMOS 5 V de 0,18 µm . Étant donné que ce processus ne prend pas en charge les appareils haute tension, des transistors MP externes sont utilisés. Idéalement, si un procédé BCD est disponible, ces transistors MP pourraient être intégrés directement sur la puce. De plus, une intégration plus poussée du contrôleur de luminosité est envisagée pour obtenir une puce de pilote intégrée monolithique, ce qui constitue un travail futur prévu. Dans la simulation de circuits, les modèles PSPICE sont utilisés pour le convertisseur élévateur, les LED et les transistors MP. Le paramètre de tension dans le modèle PSPICE pour LED est intentionnellement ajusté pour introduire des différences entre les canaux. Plus précisément, pour le canal 3, la tension de LED est réglée sur 3,20 V, ce qui représente une valeur typique. Pour les canaux 1 et 2, les paramètres sont réglés respectivement à 2,73 V et 2,76 V. Comme décrit précédemment, la valeur minimale de Vboost est dictée par le VLED du canal 3. Le contrôleur de luminosité est implémenté à l'aide de Verilog HDL et fonctionne à la fréquence de 100 MHz. La fréquence du signal PWM est de 10 KHz. L'ensemble du circuit fonctionne en mode simulation de signaux mixtes pour vérifier le processus de contrôle adaptatif et évaluer les performances du LCR.

En tenant compte de la plage de contrôle du courant et de la résolution, la taille de M0 dans le LCR est choisie comme étant de 1 µm/1 µm, et son rapport au transistor miroir est fixé à 1:4. Il existe au total 240 transistors miroir de courant . Le courant de référence IREF est réglé sur 50 µA, ce qui donne un courant de sortie unitaire de 200 µA et un courant de sortie maximum de 48 mA. La taille du MR est choisie pour être de 40 µm/2 µm × 50. La disposition globale du circuit LCR est représentée sur la figure 5. Tous les transistors miroir et leurs commutateurs de commande correspondants sont disposés sous la forme d'un réseau 15 × 16. La zone centrale ne mesure que 325 µm × 310 µm, tandis que la zone entière, y compris les coussinets, mesure 700 µm × 720 µm. Les principales tailles de transistors sont également résumées dans la figure 5.



Transistor	W/L
MR	40µm/2µm×50
M0	1µm/1µm
M1-MN	4µm/1µm

Figure 5. Disposition du LCR, conçu dans un processus CMOS de 0,18 µm et la zone centrale est de 325 × 310 µm2 .
Les principales tailles de transistors sont également résumées.

Figure 5. Disposition du LCR, conçu dans un processus CMOS de 0,18 µm et la zone centrale est de 325 × 310 µm2 .
Les principales tailles de transistors sont également résumées.

3.2. Résultats de la simulation

La figure 6 représente les caractéristiques de sortie simulées du LCR sous différents angles de processus et températures. On peut constater que lorsque le courant de sortie LCR varie de 0 mA à 48 mA, il démontre une bonne linéarité dans différentes conditions de fonctionnement.

Plus précisément, avec un réglage de courant de sortie de 20 mA, l'écart de courant maximum est de 13

Machine Translated by Google

3.2. Résultats de la simulation

La figure 6 représente les caractéristiques de sortie simulées du LCR sous différents angles de processus et températures. On peut constater que lorsque le courant de sortie LCR varie de 0 mA à 48 mA, il démontre une bonne linéarité dans différentes conditions de fonctionnement.
Plus précisément, avec un réglage de courant de sortie de 20 mA, l'écart de courant maximum est de 13 µA, ce qui entraîne une erreur de courant inférieure à 0,1 %. Dans l'ensemble, le LCR présente une bonne linéarité et précision du courant dans la plage de courant spécifiée.

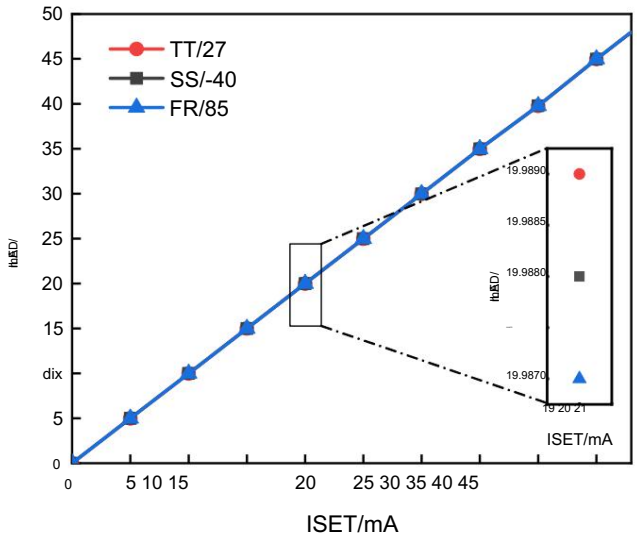


Figure 6. Courant de sortie du LCR par rapport au réglage du courant dans diverses conditions de travail.

La figure 7 représente la forme d'onde de tension à plusieurs nœuds essentiels au cours du processus adaptatif. SENSE1, SENSE2 et SENSE3 représentent les signaux SENSE des canaux correspondants. T0 désigne la phase de démarrage progressif du convertisseur boost. À la mise sous tension, la sortie du convertisseur boost Vboost atteint progressivement une valeur prédéfinie après un certain temps. Cette valeur prédéfinie est la tension minimale pour que le circuit fonctionne correctement dans diverses conditions de travail et est fixée à 25,19 V dans cette conception. À mesure que Vboost augmente, les signaux SENSE de chaque canal passent séquentiellement à 0. T1 marque la phase d'ajustement de Vboost . Pendant ce temps, le contrôleur de luminosité augmente progressivement VC, entraînant une diminution correspondante de Vboost. On constate que lorsque Vboost atteint 21,52 V, SENSE3 passe à 1, indiquant un changement d'état de la voie 3. Enfin, VC reste à 0,33 V, et Vboost se stabilise à 21,62 V. T2 marque la phase de régulation actuelle, pendant lequel le courant du canal 1 (canal 2) augmente. Lorsque SENSE1 (SENSE2) passe à 1, cela indique que l'état du canal 1 (canal 2) a changé. La régulation actuelle du canal 1 (canal 2) est interrompue et le rapport cyclique du canal 1 (canal 2) est défini conformément à l'équation (4). T3 représente la phase de travail normale, également appelée phase de suivi continu, et les signaux SENSE sont maintenus dynamiquement à 0.

La figure 8 illustre la forme d'onde actuelle dans chaque canal. Initialement, la valeur du courant de crête de chaque canal est définie sur 20 mA, avec un rapport cyclique par défaut de 100 %. Au début de T0, Vboost n'a pas été complètement établi et toutes les LED sont éteintes, ce qui entraîne un courant nul dans chaque canal. Étant donné que les LED du canal 3 ont la tension directe la plus élevée, le courant dans le canal 3 est le dernier à atteindre la valeur définie, ce qui est cohérent avec la synchronisation des signaux SENSE de la figure 7. Une fois la phase d'ajustement Vboost terminée , la phase de régulation du courant départs. On peut voir que les courants de crête dans les canaux 1 et 2 sont augmentés à 24,2 mA et 23,2 mA, respectivement, avec les cycles de service correspondants ajustés à 82,6 % et 86,2 %, garantissant des courants moyens uniformes sur les trois canaux. Lorsque la phase de travail normale commence, le contrôleur de luminosité surveille en permanence l'état du LCR. Si l'état change, c'est-à-dire que SENSE passe à 1, le courant de crête et le rapport cyclique seront mis à jour en conséquence pour « retirer » SENSE.

Machine Translated by Google

à 0. Sur la base de la forme d'onde du courant simulée, le temps de montée et le temps de descente maximum sont respectivement de 173 ns et 74 ns, sans dépassement de courant notable.

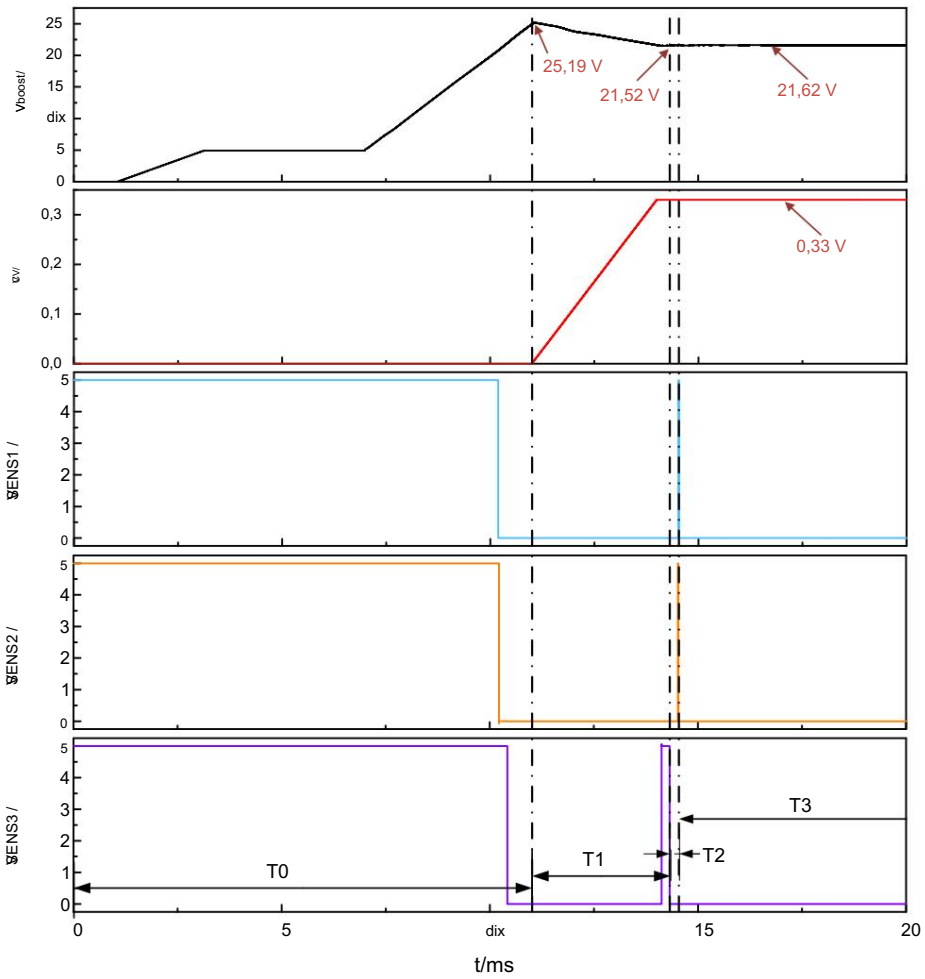


Figure 7. Formes d'onde de tension dans le cadre du processus de contrôle adaptatif.

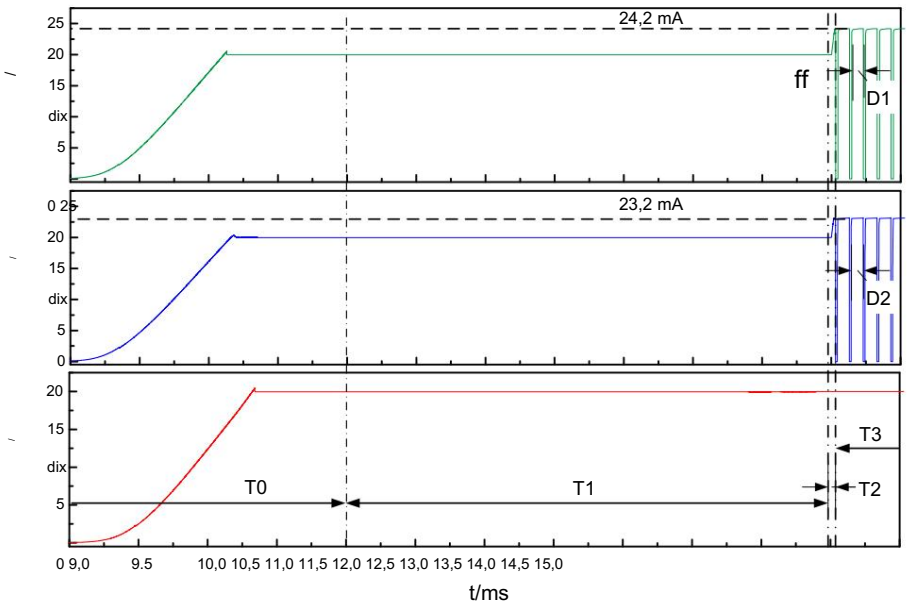


Figure 8. Formes d'onde actuelles de chaque canal sous le processus de contrôle adaptatif.

Machine Translated by Google

ff

La figure 9 compare les différences de perte de puissance entre la méthode de contrôle du courant de crête fixe et la méthode de contrôle adaptatif proposée dans cet article. Dans la méthode du courant de crête fixe, seule l' étape de réglage Vboost est exécutée, tandis que le courant de crête et le rapport cyclique restent inchangés. Comme décrit précédemment, avec la méthode du courant de crête fixe, le canal 3 subit la moindre perte de puissance, tandis que les canaux 1 et 2 subissent des pertes de puissance plus importantes en raison d'une tension excessive. La figure illustre la perte de puissance des trois canaux selon la méthode du courant de crête fixe. En revanche, avec la méthode de contrôle adaptatif, le courant de crête et le rapport cyclique sont ajustés, éliminant ainsi efficacement les tensions excessives dans les canaux 1 et 2, réduisant ainsi considérablement les pertes de pu Comme le montre la figure, lorsque le courant nominal du canal est réglé sur 20 mA, la méthode de contrôle adaptatif réduit la perte de puissance de 74 %.

ff

ff

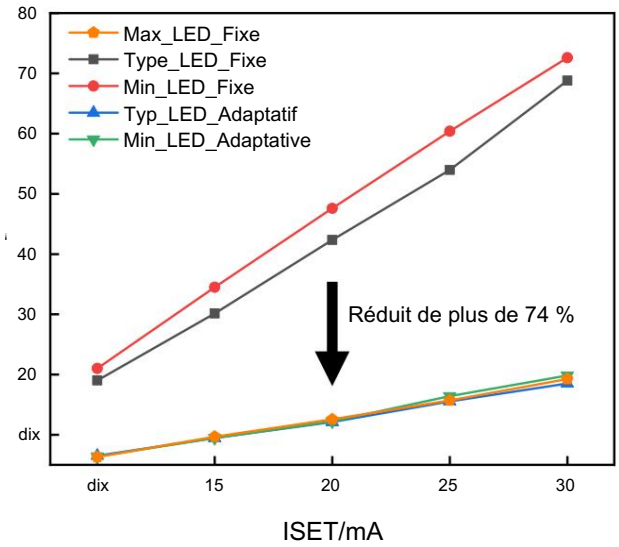


Figure 9. Pertes de puissance du LCR avec la méthode du courant de crête fixe et la méthode de contrôle adaptatif proposée.

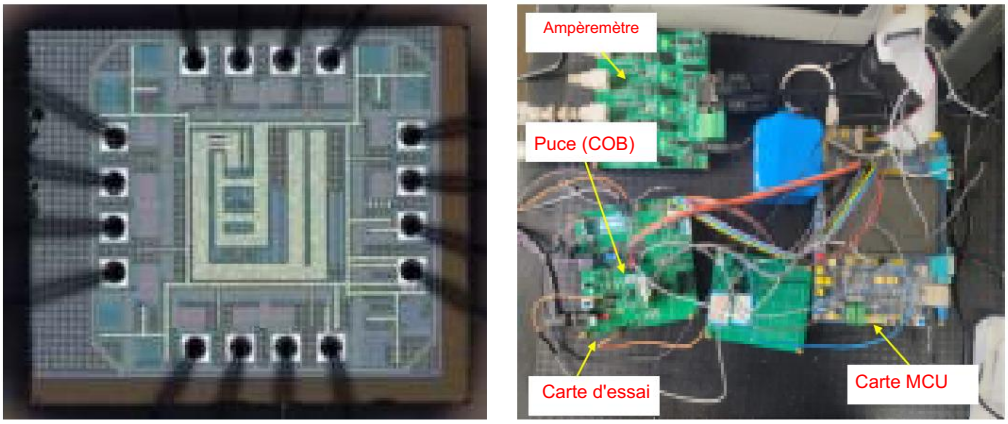
3.3. Résultats de mesure

La figure 10 présente une microphotographie de la puce fabriquée avec des fils de liaison, ainsi que la configuration de test de puce. La puce est logée dans un boîtier COB (chip-on-board) et montée sur la carte de test. Le courant de référence IREF est fourni par la carte de test. Une carte de développement MCU STM32F407 (de ST Microelectronics) sert de contrôleur de luminosité, et le DAC intégré dans le MCU est utilisé pour générer du VC. Un ampèremètre multicanal est connecté en série entre chaque chaîne de LED et le drain du transistor MOS haute tension pour mesurer le courant moyen des canaux de LED. Cet ampèremètre prend en charge l'enregistrement de données en temps réel via un port série. Les formes d'onde de tension au niveau des nœuds du circuit sont capturées à l'aide d'un oscilloscope numérique, en particulier le RTB2004 de Rohde & Schwarz. Pour simplifier les tests, seuls deux canaux LED sont implémentés, chacun comprenant 6 LED. Il est à noter que les LED sont intentionnellement sélectionnées pour créer une différence d'environ 500 mV dans la tension directe à travers la chaîne de LED entre les deux canaux. Le canal 2 a la tension directe la plus faible. Cette différence délibérée renforce la démonstration de l' efficacité du circuit.

La température intérieure a été maintenue à environ 27 ◦C. La figure 11 illustre les formes d'onde de tension mesurées de VPWM et Vloss pour le canal 2 après le processus de contrôle adaptatif initial. Le réglage du courant du canal Iset est de 20 mA. Les quatre chiffres correspondent au cas où VREF est réglé respectivement sur 1 V, 0,6 V, 0,4 V et 0,3 V. Le cycle de service du VPWM dans chaque cas est enregistré comme étant respectivement de 68,57 %, 68,86 %, 68,43 % et 68,53 %. Lorsque VPWM est élevé, le canal est activé et la perte V dans chaque cas est mesurée à 1,06 V, 0,69 V, 0,49 V et 0,36 V, respectivement. Lorsque VPWM passe à un niveau bas, le canal est fermé et l'augmentation de Vloss est principalement attribuée à l'influence des effets de courant de fuite. Ç

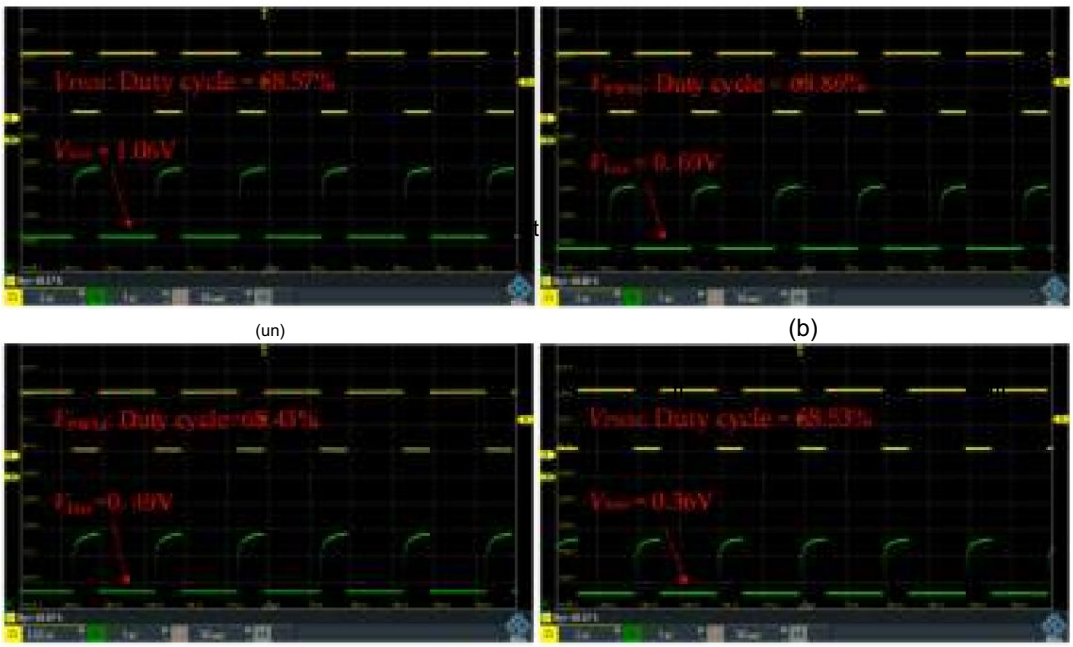
Machine Translated by Google

On peut déduire des chiffres que malgré la diminution de VREF de 1 V à 0,3 V, ce qui peut amener les transistors miroir de courant du LCR à entrer dans la région linéaire, la précision du courant de sortie peut toujours être maintenue et le rapport cyclique du VPWM reste cohérent dans tous ces paramètres.



(un) (b)

Figure 10. (a) Microphotographie de la puce LCR ; (b) tester le système.

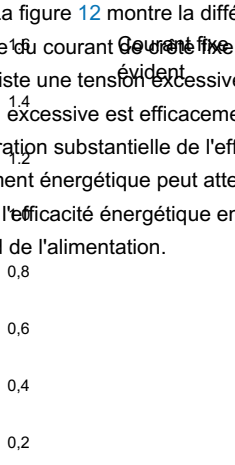


(un) (b)

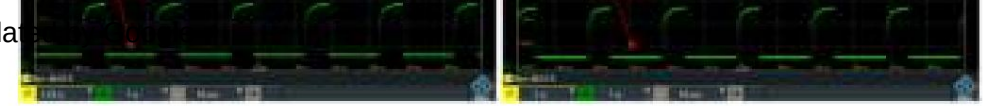
(c) (d)

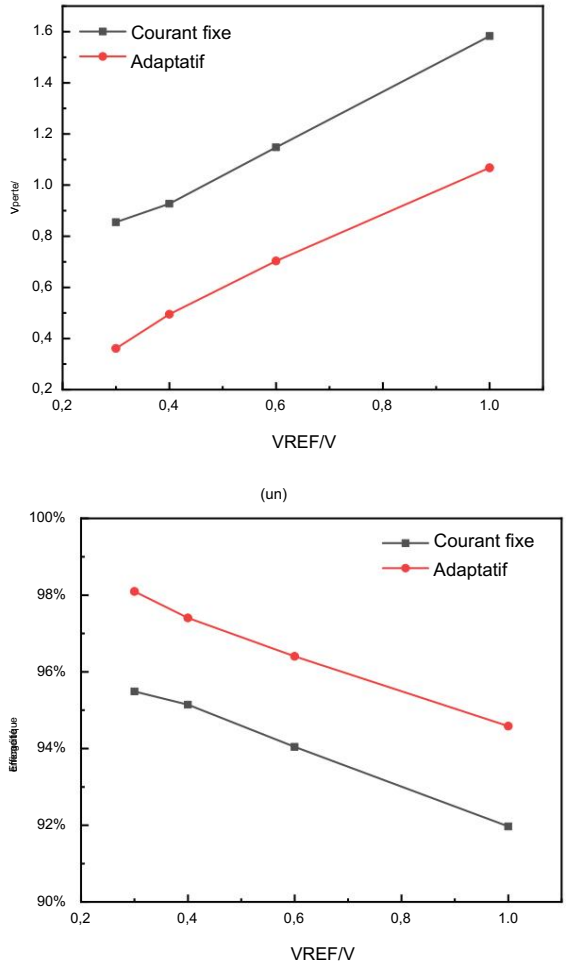
Figure 11. Formes d'onde de tension de VPWM et Vloss sous (a) VREF = 0,3 V, (b) VREF = 0,4 V, (c) VREF = 0,6 V et (d) VREF = 1 V. Iset = 20 mA.

La figure 12 montre la différence de perte V et d'efficacité énergétique du canal 2 sous la méthode de contrôle du courant de crête fixe et la méthode de contrôle adaptatif. D'après la figure 12a, adaptative, il est très évident qu'il existe une tension excessive d'environ 500 mV dans le canal 2. Avec la méthode de contrôle adaptatif, cette tension excessive est efficacement atténuée grâce à des ajustements dans l'ILED, ce qui entraîne une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique. Plus précisément, lorsque VREF est réglé sur 300 mV, le rendement énergétique peut atteindre 98,1 % pour un ILED de 20 mA. En principe, il est possible d'améliorer encore l'efficacité énergétique en réduisant encore plus VREF , la limite supérieure étant limitée par VCOM, qui dépend de l'alimentation.



Machine Translat





(b)

Figure 12. Comparaison entre la méthode du courant de crête fixe et le contrôle adaptatif proposé méthode en ce qui concerne (a) la perte V et (b) l'efficacité énergétique.

Le tableau 1 compare divers paramètres et mesures de performance entre les pilote adaptatif et autres références existantes. La conception proposée démontre des avantages tels qu'une large plage de courant de sortie et un rendement énergétique élevé. En fait, le tableau 1 ne révèle que l'efficacité d'un seul canal. Mais plus important encore, le projet proposé la méthode adaptative vise à améliorer l'efficacité de chaque canal dans une LED multicanal conducteur. Il compense efficacement la tension excessive sur le LCR grâce à un contrôle adaptatif avec une complexité de mise en œuvre modérée.

Tableau 1. Comparaison des paramètres de performances.

Réf	[17]	[41] [42] BCD 0,35 µm CMOS	[43]	Ce travail
Processus	0,5 µm CMOS 40 nm CMOS 40 nm CMOS 0,18 µm			
Surface centrale (mm2)	N/A 6– +	N/AN/A 3–4,2 3,2–4,2 20 25 2 +	N/A +	0,1
Alimentation (V)	27 30	6 5,36 22,5 ~300 ~675 94,4 %	3,2–4,2	5
ILED maximum (mA)	8	97 % Oui Oui Non Non	25	48
Configuration de la chaîne LED.				6
Vboost (V)	26,41		6	18,96 *
Perte V (mV)	~400		20	360*
Réglage de l'efficacité	98,4 %		~480	98,1% *
énergétique Vboost	Oui		97,6	Oui
Réglage canal par canal	Non		% Oui Non	Oui

* Mesuré à Iset = 20 mA, δset =δ00 %. + Pas disponible.

Machine Translated by Google

4. Résumé

Dans cet article, un pilote de rétroéclairage LED adaptatif à haut rendement est conçu pour résoudre le problème de la perte de puissance excessive causée par les variations de la tension directe des LED. En ajustant le courant de crête, la cohérence de la tension directe de la chaîne de LED au sein de chaque canal est obtenue. Cela minimise la tension sur le LCR dans chaque canal, optimisant ainsi la perte de puissance excessive dans chaque canal et le rendement énergétique total. De plus, l'ajustement du rapport cyclique garantit la cohérence de la luminosité sur chaque canal. Basé sur le processus CMOS 1P4M de 0,18 µm, un circuit LCR adapté au contrôle adaptatif a été conçu et fabriqué. Le circuit utilise une structure de miroir de courant et des transistors MOS fonctionnant dans la région linéaire pour garantir la précision du courant et l'efficacité énergétique. Le circuit LCR conçu prend en charge une plage de courant de sortie de 0 à 48 mA. Pour vérifier l'efficacité du circuit de contrôle adaptatif, un pilote expérimental de rétroéclairage LED à deux canaux a été construit à l'aide des puces LCR conçues. Chaque canal est constitué de 6 LED et la différence de tension directe entre les canaux est intentionnellement étendue à environ 500 mV. Les résultats des tests démontrent que le circuit de commande adaptatif présenté élimine cette différence de tension directe et réduit la perte de puissance excessive. Lorsque la tension de référence est réglée sur 300 mV, un rendement énergétique de 98,1 % est atteint à 20 mA. En fait, le pilote expérimental à deux canaux peut être étendu à une implémentation multicanal. Bien que seule une puce LCR soit conçue et fabriquée dans cette étude, les transistors MP et le contrôleur de luminosité peuvent tous deux être intégrés pour réaliser une puce de pilote intégrée monolithique utilisant

Contributions des auteurs : Conceptualisation, WZ et QZ ; méthodologie, XX, QZ, CJ et ZZ ; logiciel, XX ; validation, XX, QZ, CJ et ZZ ; analyse formelle, XX ; enquête, XX, QZ, CJ et ZZ ; ressources, XX et QZ ; conservation des données, XX et QZ ; rédaction – préparation du projet original, XX et QZ ; rédaction – révision et édition, WZ et XX ; supervision, WZ et JT ; administration de projet, WZ et JT ; acquisition de financement, WZ Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par le projet de recherche scientifique du ministère provincial de l'Éducation du Hunan (23A0260) et par le projet d'innovation en pratique pour les diplômés de l'Université des sciences et technologies de Changsha (CLSJCX24079).

Déclaration de disponibilité des données : Les données présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès de l' auteur correspondant.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Tsao, JY Éclairage à semi-conducteurs : lampes, puces et matériaux pour demain. IEEE Circuits Périphériques Mag. 2004, 20, 28-37. [Référence croisée]

Yadlapalli, RT; Narasipuram, RP ; Kotapati, A. Un aperçu des topologies de pilotes de LED à semi-conducteurs économes en énergie. Int. J. Énergie 2. Rés. 2020, 44, 612-630. [Référence croisée]

3. Demain, éclairage LED RC en horticulture. HortScience 2008, 43, 1947-1950. [Référence croisée]

4. Cho, J. ; Parc, JH ; Kim, JK ; Schubert, EF Diodes électroluminescentes blanches : histoire, progrès et avenir. Laser Photonique Rév. 2017, 11, 1600147. [Réf. croisée]

5. Surkanti, PR ; Mehrotra, D. ; Furth, PM Pilote de LED multicanal avec adaptation précise du courant pour les applications portables. Dans les actes du 62e Symposium international du Midwest sur les circuits et les systèmes (MWSCAS) de l'IEEE 2019, Dallas, Texas, États-Unis, du 4 au 7 août 2019 ; pp. 941-944.

6. Pal, N. ; Poisson, A. ; McIntyre, W. ; Griesert, N. ; Hiver, G. ; Eichhorn, T. ; Pilawa-Podgurski, R. ; Hanumolu, PK Un pilote de LED de rétroéclairage basé sur un convertisseur hybride boost-SC 30 V efficace à 91 % en CMOS 180 nm. Dans les actes de la conférence IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC) 2020, Boston, MA, États-Unis, 22-25 mars 2020 ; p. 1 à 4.

7. Pressman, A. Conception d'alimentation à découpage ; McGraw-Hill, Inc. : New York, NY, États-Unis, 1997.

8. Wang, Y. ; Alonso, JM; Ruan, X. Un examen des pilotes de LED et des technologies associées. IEEETrans. Ind. Électron. 2017, 64, 5754-5765. [Référence croisée]

9. Gupta, N. ; Verma, D. Un examen et une analyse des topologies des pilotes de diodes électroluminescentes (LED). Dans les actes de la 2e conférence internationale de l'IEEE 2021 sur l'énergie électrique et les systèmes énergétiques (ICEPES), Bhopal, Inde, 10 et 11 décembre 2021 ; p. 1 à 6.

10. Oh, T.-J. ; Cho, A. ; Ki, SL ; Hwang, I.-C. L'invention concerne un circuit intégré d'attaque de LED boost à commande numérique, à faible consommation et à faible coût, pour les rétroéclairages. Dans les actes de la conférence IEEE Asian Solid State Circuits (A-SSCC) 2012, Kobe, Japon, 12-14 novembre 2012 ; pp. 237-240.

Machine Translated by Google

11. Lee, S.-W. ; Choe, H.-J. ; Yun, J.-J. Amélioration des performances d'un pilote de LED boost avec gain de tension élevé pour les rétroéclairages LED éclairés par les bords . IEEETrans. Système de circuits. II Mémoires Express 2017, 65, 481-485. [Référence croisée]
12. Chen, H. ; Zhang, Y. ; Ma, D. Un circuit intégré de pilote à chaîne parallèle SIMO pour un rétroéclairage LED à intensité variable avec optimisation de la tension du bus local et une boucle de régulation unique en temps partagé. IEEETrans. Électron de puissance. 2011, 27, 452-462. [Référence croisée]
13. Kim, H.-C. ; Yoon, CS ; Jeong, D.-K.; Kim, J. Un pilote de LED à équilibrage de courant à inducteur unique et à canaux multiples pour l'affichage applications de rétroéclairage. IEEETrans. Ind. 2014, 50, 4077-4081. [Référence croisée]
14. Chen, J.-H. ; Wang, SC ; Liu, Y.-H. ; Cheng, YS ; Yang, Z.-Z. Système de pilotage à rétroéclairage LED RVB avec capacité de régulation dynamique de la tension . Dans les actes de la 10e conférence internationale de l'IEEE 2013 sur l'électronique de puissance et les systèmes d'entraînement (PEDS), Kitakyushu, Japon, 22-25 avril 2013 ; pp. 349-353.
15. Liu, P.-J. ; Hong, Z.-Y.; Hung, C.-C. Pilote de LED RVB AC-DC basse consommation à un étage avec schéma de commande de condensateur de commutation. IEEETrans. Ind. Électron. 2020, 68, 3103-3112. [Référence croisée]
16. Kim, J.-S. ; Lee, Y.-K.; Lee, J.-S. ; Shin, Y.-K.; Tark, J.-H. ; Ryu, K.-C.; Yang, B.-D. Un pilote d'impulsion de courant à commutation rapide pour le rétroéclairage LED. Dans Actes du Symposium international IEEE 2009 sur les circuits et les systèmes, Taipei, Taiwan, 24-27 mai 2009 ; pages 1775-1778.
17. Hong, SI ; Han, J.-W.; Kim, D.-H. ; Kwon, O.-K. Un circuit intégré de pilote de rétroéclairage LED de contrôle à double boucle pour les écrans LCD de taille moyenne. Dans les actes de la Conférence internationale sur les circuits à semi-conducteurs de l'IEEE 2010 (ISSCC), San Francisco, Californie, États-Unis, 7-11 février 2010 ; 116-117.
18. Huang, Y.-C. ; Chen, H.-W. Un nouveau pilote d'impulsion de courant à commutation rapide pour les applications de rétroéclairage LED. Dans Actes de la Conférence internationale IEEE 2016 sur l'électronique grand public-Taiwan (ICCE-TW), Nantou, Taiwan, 27-29 mai 2016 ; p. 1–2.
19. Ahn, H.-A. ; Hong, SK ; Kwon, O.-K. Un régulateur de courant à commutation rapide utilisant une méthode de réduction du temps de rotation pour une gradation élevée ratio de pilotes de rétroéclairage LED. IEEETrans. Système de circuits. II Mémoires Express 2016, 63, 1014-1018. [Référence croisée]
20. Han, H. ; Zhang, F. ; Liu, M. Méthode de gradation PWM pour le circuit de partage de courant à condensateur dans le système de rétroéclairage LED. IEEE J. Émerger. Sel. Haut. Électron de puissance. 2018, 6, 1190-1197. [Référence croisée]
21. Hong, SI ; Nam, K.-S. ; Jung, Y.-H.; Ahn, HA; Dans, H.-J. ; Kwon, O.-K. Circuit intégré de pilote de rétroéclairage à diode électroluminescente, très économe en énergie et fiable, pour la commande de courant uniforme d'écrans à cristaux liquides de taille moyenne. J. Inf. Disp. 2012, 13, 73-82. [Référence croisée]
22. Lim, B.-M. ; Ko, Y.-H. ; Jang, Y.-S.; Kwon, O.-H.; Han, SK ; Lee, S.-G. Un pilote de LED abaisseur de 200 V à efficacité de 98,16 % utilisant un contrôle de courant intégré pour améliorer la précision du courant pour les applications de rétroéclairage LED à chaîne unique à grande échelle. IEEETrans. Électron de puissance. 2015, 31, 6416-6427. [Référence croisée]
23. Parthasarathy, MK; Ganesan, N. Un nouveau pilote de diode électroluminescente à huit canaux à inductance unique pour un affichage à faible consommation applications de rétroéclairage. Turc. J. Electr. Ing. Calculer. Sci. 2018, 26, 2130-2139. [Référence croisée]
24. Lui, J.-P. ; Zhang, B. ; Gao, X. ; Wu, CD; Li, Z.-J.; Zhou, J.-Y. Une méthode de gradation analogique de LED à faible tension de haute précision. IEEE Accès 2019, 7, 172362-172373. [Référence croisée]
25. Lin, C.-L. ; Chen, SC ; Deng, MY ; Ho, Y.-H. ; Lin, CA-A.; Tsai, CL-L.; Liao, WS ; Liu, C.-I.; Wu, CE-E.; Peng, J.-T. Circuit de pilotage AM PWM pour rétroéclairage mini-LED dans les écrans à cristaux liquides. IEEE J. Appareils électroniques Soc. 2021, 9, 365-372. [Référence croisée]
26. Schubert, Diodes électroluminescentes EF (2018) ; Institut polytechnique Rensselaer : Tory, NY, États-Unis, 2018.
27. Liu, C.-H. ; Hsieh, C.-Y.; Hsieh, Y.-C.; Tai, T.-J.; Chen, K.-H. Technique de temps d'arrêt adaptatif contrôlé par SAR sans résistance de détection pour obtenir un système d'éclairage LED de haute efficacité et précision. IEEETrans. Système de circuits. Je régule. Bouillie. 2009, 57, 1384-1394.
28. Lohaus, L. ; Rossius, A. ; Dietrich, S. ; Wunderlich, R. ; Heinen, S. Un pilote de LED à intensité variable utilisant un contrôle de rétroaction DAC résistif pour une régulation adaptative de la tension. Dans les actes du congrès et exposition IEEE Energy Conversion 2013, Denver, CO, États-Unis, 15-19 septembre 2013 ; pp. 3126-3133.
29. Hsieh, C.-Y.; Wei, YS ; Chen, K.-H. ; Lin, T.-C. Driver LED efficace avec une technique de suivi de référence adaptative. Dans Actes de la 16e Conférence internationale de l'IEEE 2009 sur l'électronique, les circuits et les systèmes (ICECS 2009), Yasmine Hammamet, Tunisie, 13-16 décembre 2009 ; pp. 291-294.
30. Liu, P.-J. ; Hsu, S.-R.; Chang, C.-W.; Liao, CY ; Chien, L.-H. Driver LED blanc à intensité variable avec contrôle de retour de tension adaptatif. Dans les actes de la 2e conférence internationale sur l'électronique des énergies futures (IFEEC) de l'IEEE 2015, Taipei, Taiwan, 1er-4 novembre 2015 ; p. 1 à 4.
31. Jung, YH; Hong, Saskatchewan ; Kwon, OK Un driver de LED transitoire rapide avec contrôle de fréquence adaptatif en fonction de la variation de charge pour rétroéclairage LCD de grande taille. J. Soc. Inf. Disp. 2017, 25, 712-724. [Référence croisée]
32. Hsu, Y.-C.; Lin, J.-Y. ; Chen, CC-P. Driver LED RVB à faible consommation de surface et à haut rendement avec tension de commande adaptative et technique d'économie d'énergie. Énergies 2018, 11, 1422. [CrossRef]
33. Yong, W. ; Baoxing, D. ; Yi, L. ; Ting, L. ; Yintang, Y. Un pilote de rétroéclairage LED Boost haute efficacité multicanal avec un rapport de gradation élevé. Dans Actes de la Conférence internationale 2017 sur l'industrie électronique et l'automatisation (EIA 2017), Suzhou, Chine, 23-25 juin 2017 ; pp. 110-116.
34. Hsieh, Y.-T.; Liu, BD ; Wu, J.-F. ; Fang, CL-L.; Tsai, HH ; Juang, Y.-Z. Un driver LED à rapport de gradation élevé pour les rétroéclairages LCD. IEEETrans . Électron de puissance. 2012, 27, 4562-4570. [Référence croisée]
35. Chiu, H.-J. ; Lo, Y.-K.; Chen, J.-T. ; Cheng, S.-J. ; Lin, CY ; Mou, S.-C. Un driver de LED dimmable à haut rendement pour une faible consommation applications d'éclairage. IEEETrans. Ind. Électron. 2009, 57, 735-743. [Référence croisée]
36. Hu, Y. ; Jiang, L. ; Wen, W. ; Yan, W. ; Ding, R. Une nouvelle approche de tension de pilotage adaptative pour le pilote de LED. Dans les actes de la conférence et exposition IEEE 2019 sur l'électronique de puissance appliquée (APEC), Anaheim, Californie, États-Unis, 17-21 mars 2019 ; pp. 721-726.

Machine Translated by Google

37. Wu, C.-H. ; Chen, C.-L. Pompe de charge à courant régulé à haut rendement pour un driver de LED blanche. IEEETrans. Système de circuits. II Express Mémoires 2009, 56, 763-767.
38. Mu, H. ; Geng, L. ; Liu, J. Une source de courant constant de haute précision appliquée dans un pilote de LED. Dans les actes du colloque 2011 sur la photonique et l'optoélectronique (SOPO), Wuhan, Chine, 16-18 mai 2011 ; p. 1 à 4.
39. Sansen, WM: Essentiels de la conception analogique ; Springer Science & Business Media : Berlin, Allemagne, 2007 ; Tome 859.
40. Hogervorst, R. ; Tero, JP ; Eschauzier, RG; Huijsing, JH Une entrée/sortie rail-à-rail CMOS 3 V compacte et économe en énergie amplificateur opérationnel pour bibliothèques de cellules VLSI. IEEE J. Circuits à semi-conducteurs 1994, 29, 1505-1513. [Référence croisée]
41. Surkanti, PR ; Mehrotra, D. ; Gangineni, M. ; En outre, pilote de LED multichaîne PM avec adaptation précise du courant et annulation dynamique de l'inadéquation de tension directe. Dans Actes du 60e Symposium international du Midwest sur les circuits et les systèmes (MWSCAS) de l'IEEE 2017, Boston, MA, États-Unis, 6-9 août 2017 ; pp. 229-232.
42. Shahroury, FR; Ahmad, HH ; Abuishmais, I. Aspects de conception d'un pilote WLED multichaîne à sortie unique utilisant la technologie CMOS 40 nm. J. Électron de faible puissance. Appl. 2022, 12, 5. [Réf. croisée]
43. Abuishmais, I. ; Shahroury, FR; Ahmad, H. Une méthodologie de conception d'un dissipateur de courant variable à haute efficacité pour les pilotes régulés en courant. Électronique 2022, 11, 2566. [CrossRef]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Détection d'objets et estimation de distance stable monoculaire pour Environnements routiers : une architecture de fusion utilisant YOLO-RedeCa et un filtre de changement de saut anormal

Hejun Niv., Yu Du*, Yan Ma et Ying Yuan

Laboratoire clé d'ingénierie des services d'information de Pékin, Collège de robotique, Université de l'Union de Pékin, Pékin 100101, Chine ; lyuhejun@163.com (HL); jqrmayan@buu.edu.cn (YM); yueeing@163.com (AA)
* Correspondance : duyu@buu.edu.cn

Résumé : Permettre une perception environnementale globale rapide et précise pour les véhicules pose un défi majeur. La détection d'objets et l'estimation de distance monoculaire sont les deux technologies principales, bien qu'elles soient souvent utilisées séparément. Il est donc nécessaire de renforcer et d'optimiser l'interaction entre eux. Le mouvement du véhicule ou l'occlusion d'objets peuvent provoquer des variations soudaines dans les positions ou les tailles des zones de détection au sein des données temporelles, entraînant des fluctuations dans les estimations de distance Nous proposons donc une méthode pour intégrer un détecteur basé sur YOLOv5-RedeCa, un tracker Bot-Sort et un filtre de changement de saut d'anomalie. Cette combinaison permet une détection et un suivi plus précis des objets. Le filtre de saut d'anomalie atténue les variations de distance causées par des changements soudains dans la taille des boîtes de détection. Notre méthode augmente la précision tout en réduisant les exigences de calcul, affichant des performances exceptionnelles sur plusieurs ensembles de données. Notamment, sur l'ensemble de données KITTI, l' écart type des résultats de mesure continue reste systématiquement faible, en particulier dans les scénarios comportant plusieurs occlusions ou disparitions d'objets. Ces résultats valident l'efficacité et la précision de notre méthode dans la gestion de tâches doubles.

Mots-clés : technique de conduite automatique ; détection d'objets ; mesure de distance monoculaire; Filtre de Kalman

check for updates

Citation : Lv, H. ; Du, Y. ; Peut.; Yuan, Y. Détection d'objets et monoculaire Estimation de distance stable pour la route Environnements : une architecture de fusion Utilisation de YOLO-RedeCa et du filtre de changement de saut anormal. Électronique 2024, 13, 3058. https://doi.org/10.3390/électronique13153058

Rédacteur académique : Felipe Jiménez

Reçu : 24 juin 2024
Révisé : 19 juillet 2024
Accepté : 26 juillet 2024
Publié : 2 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Une perception et une compréhension efficaces de l'environnement routier sont cruciales pour la technologie de conduite autonome [1]. Cependant, parvenir à une perception globale de l' environnement pour les véhicules pose un problème difficile. Ce système de perception complet effectue plusieurs tâches. Il détecte divers objets autour du véhicule.
De plus, il obtient les distances entre ces objets et le véhicule. Par conséquent, nous nous concentrons sur les méthodes permettant de réaliser des tâches doubles. Nos méthodes détectent simultanément les objets autour du véhicule et déterminent les distances jusqu'à ces objets. Plus de détails peuvent être trouvés dans la figure 1.

Dans la conduite autonome, une détection précise des objets est cruciale pour l'estimation dynamique de la distance, affectant directement la sécurité et l'efficacité du système [2]. L'estimation dynamique de la distance, dans le cadre d'une perception de niveau supérieur, peut simuler la perception intuitive des conducteurs humains.

Les méthodes existantes de mesure de distance basées sur le radar et la vision stéréo, bien qu'efficaces, se heurtent à des défis tels que des coûts élevés, la complexité du système et de mauvaises performances en temps réel . En outre, il convient d'explorer si la technologie actuelle de perception à vol d'oiseau (BEV) nécessite un soutien plus profond des caractéristiques visuelles humaines [3]. Les méthodes de mesure de distance monoculaire existantes manquent de robustesse face à des changements soudains de valeur, ce qui affecte directement la perception et la qualité de prise de décision des systèmes de conduite autonomes dans des environnements dynamiques.

Machine Translated by Google

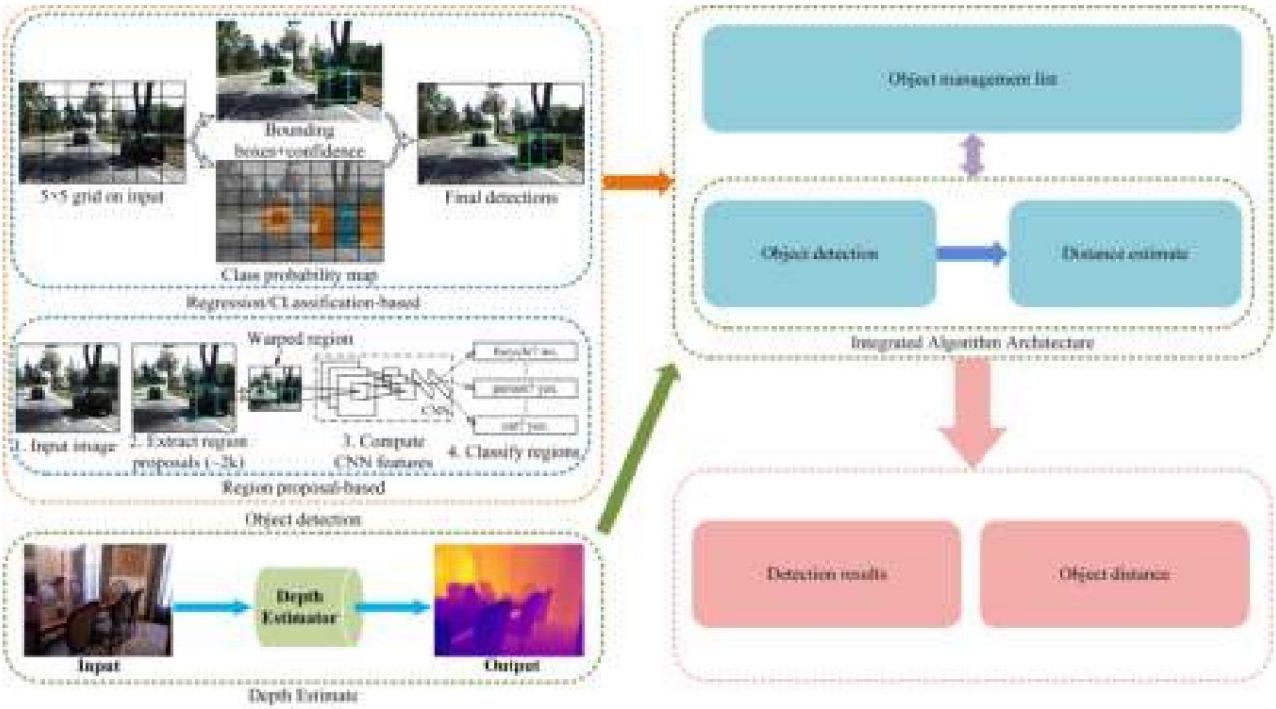


Figure 1. Le côté gauche est le cadre principal de détection d'objets avec estimation de profondeur monoculaire. À droite se trouve l'architecture de l'algorithme que nous allons implémenter et le résultat.

Le but de cette étude est de proposer une méthode de mesure de distance monoculaire. Ce La méthode vise à la fois à détecter des objets et à déterminer la distance entre les objets et le véhicule. En combinant les méthodes YOLOv5-RedeCa et de filtre de saut d'anomalie, le Cette approche vise à améliorer la précision et la robustesse de l'estimation dynamique de la distance, abordant ainsi les défis de perception et de prise de décision dans des environnements dynamiques. Notre méthode démontre un potentiel significatif dans l'extraction de caractéristiques et l'estimation de distance . De plus, il fournira des informations perceptuelles plus fiables et plus riches pour systèmes de conduite autonomes, améliorant ainsi considérablement la sécurité et l'efficacité de la conduite . Cela fait de notre méthode un candidat prometteur pour des avancées révolutionnaires dans technologie de conduite autonome.

Révision des travaux antérieurs dans le domaine de la détection d'objets 2D, basée sur des propositions de régions Les méthodes (par exemple, R-CNN) [4] ont considérablement amélioré la précision de la détection grâce à une approche de détection en deux étapes, fonctionnant exceptionnellement bien dans des arrière-plans complexes. Cependant, ils sont relativement lents en calcul. En revanche, bien que les détecteurs à un seul étage (par exemple, YOLO) [5] font un léger compromis sur la précision, ils prédisent directement les positions et les catégories d'objets dans une image par régression/classification, simplifiant ainsi le modèle structure et processus de calcul, les rendant adaptés au traitement en temps réel [6]. Nous les utilisons donc comme référence pour notre détecteur.

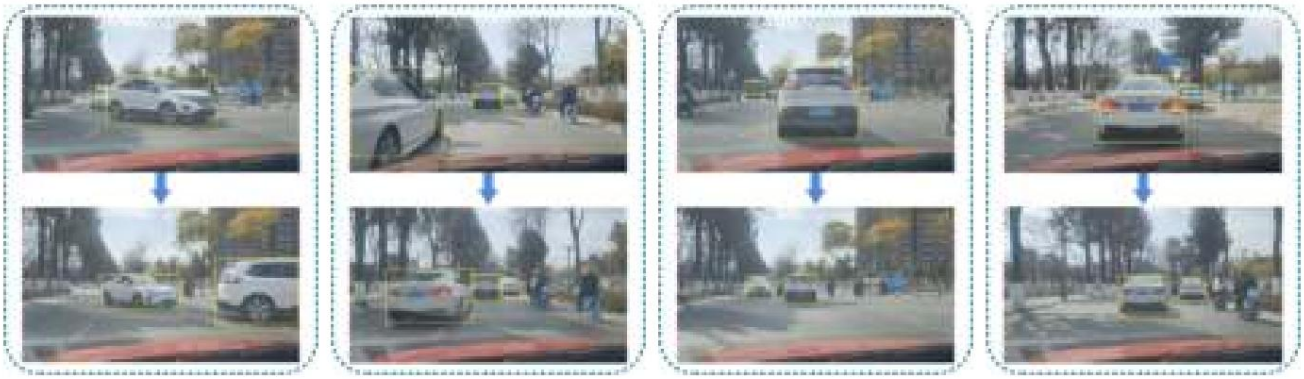
La détection d'objets à elle seule ne peut pas percevoir pleinement l'environnement sans informations sur la distance [7]. Les méthodes traditionnelles d'estimation de la profondeur utilisent des repères monoculaires ou conçus manuellement fonctionnalités [8,9], mais elles sont souvent sous-performantes dans des scénarios de profondeur variable.

L'apprentissage profond, en particulier avec les réseaux de neurones convolutifs (CNN), offre des cartographie pixel-profondeur [10]. Les réseaux multi-échelles et les fonctions de perte invariantes d'échelle ont précision améliorée de l'estimation de la profondeur. Contrairement aux méthodes traditionnelles, l'apprentissage profond génère automatiquement des cartes de disparité et des informations de profondeur sans annotation approfondie, généralement à l'aide de séquences vidéo ou d'images stéréo. Toutefois, ces méthodes nécessitent d'importantes ressources informatiques.

En conduite autonome, informations continues sur la détection d'objets dans le domaine temporel est utilisé pour le suivi des objets et l'estimation de la distance. Cependant, les vibrations provoquées par le véhicule les mouvements et les occultations peuvent perturber la stabilité des objets dans la séquence vidéo. Ceci peut

Machine Translated by Google

entraîner des changements brusques dans la position ou la taille des boîtes de détection, comme le montre la figure 2. Il est donc nécessaire de lisser les cases de détection.



(un) (b) (c) (d)

Figure 2. Les cadres de délimitation pour les captures non idéales et idéales d'objets de scène routière sont illustrés. (a – d) représentent des images consécutives de quatre séquences vidéo distinctes. Dans (a,b), les dimensions du cadre de délimitation présentent des changements brusques lorsque l'objet cible subit des événements d'apparition, de disparition ou d'occlusion soudains. À l'inverse, (c, d) décrivent des scénarios dans lesquels la cible est clairement visible et le cadre de délimitation encapsule avec précision l'objet cible dans des conditions normales.

Même si les algorithmes de détection d'objets 2D ont fait des progrès significatifs, ils restent spécialisés. De même, les algorithmes d'estimation de profondeur monoculaire ont considérablement progressé. Cependant, les recherches dans ces deux domaines restent relativement distinctes. L'intégration entre la détection d'objets et l'estimation de la profondeur fait encore défaut. Dans les recherches existantes, la détection d'objets manque souvent d'estimation de profondeur intégrée, et l'estimation de profondeur n'inclut pas de capacités de reconnaissance d'objets. Cette situation met en évidence un besoin urgent. Développer un système intégré combinant détection d'objets et estimation de profondeur est essentiel. Un tel système optimiserait l'interaction entre les deux techniques. Par conséquent, cela améliorerait leur efficacité dans les applications pratiques.

Par conséquent, nous proposons et concevons une architecture d'algorithme holistique qui fusionne les objets détection et estimation de distance. Nos principales contributions sont les suivantes :

1. Nous concevons le module RedeCa pour améliorer la capacité d'extraction de fonctionnalités, permettant une détection d'objets plus précise dans les scénarios de trafic routier. Pour garantir des performances en temps réel, nous utilisons une architecture de réseau convolutionnel profondément séparable.
2. Nous intégrons un mécanisme d'association multi-trame, pour améliorer la robustesse de l'algorithme en cas d'occlusion d'objet ou de perte temporaire, permettant le suivi et la télémétrie simultanés de plusieurs objets différents.
3. Nous concevons un filtre de changement de saut d'anomalie pour améliorer la précision et la robustesse de l'estimation de la distance. Ce filtre élimine les anomalies causées par des changements soudains dans la taille de la boîte de détection dans une trame. Il lisse la variation de la distance de l'objet. Par conséquent, la fiabilité de la télémétrie est améliorée.

L'algorithme que nous proposons a remporté la médaille d'or lors de la 3e conférence sur les véhicules connectés intelligents en Chine (Shenyang). Il a également obtenu la médaille de bronze dans le groupe perception et contrôle des décisions lors du concours de simulation virtuelle Metaverse du World Intelligent Driving Challenge 2023 .

2. Travaux connexes

Dans le domaine de la conduite autonome, comment faire en sorte que le véhicule perçoive pleinement son environnement est un défi de taille. Cette perception globale inclut non seulement la détection de différents objets environnants, mais également l'acquisition des distances entre ces objets et le véhicule. Actuellement, l'utilisation de caméras à lumière visible constitue une approche courante et rentable pour résoudre ce problème. Équipées d' éléments photosensibles, les caméras à lumière visible peuvent capturer des images couleur du monde réel. Des chercheurs

Machine Translated by Google

effectuer une analyse approfondie de ces images couleur pour accomplir des tâches de perception clés telles que la détection d'objets et l'estimation de la distance.

Détection d'objets de trafic. La détection d'objets est l'un des problèmes centraux dans le domaine de la vision par ordinateur [11]. Il vise à classer et déterminer la position des objets dans les images.
Les réseaux de neurones convolutifs profonds (DCNN) ont fourni un soutien important au développement de techniques de détection d'objets grâce à leurs capacités exceptionnelles de représentation de caractéristiques [12, 13]. Généralement, les principales architectures de détection d'objets peuvent être divisées en deux catégories : les méthodes de détection d'objets basées sur des propositions de régions et les méthodes de détection d'objets basées sur la régression/classification [6]. Chacun d'eux a ses propres caractéristiques, répondant à des défis techniques différents.

Les modèles représentatifs d'architectures de détection d'objets basées sur des propositions de régions incluent RCNN [4] et ses améliorations ultérieures telles que SPPNet [14], Fast RCNN [15], Faster R-CNN [16], Mask RCNN [17] et R-FCN. [18]. La première étape de ces architectures génère des propositions de régions candidates. La deuxième étape effectue une classification détaillée et un raffinement du cadre de délimitation sur ces régions. Ce traitement par étapes améliore considérablement la précision de la détection, offrant notamment d'excellentes performances dans des arrière-plans complexes. Par exemple, pour résoudre le problème de la lenteur de génération des propositions, Faster R-CNN introduit le réseau de propositions régionales (RPN). Il est important d'améliorer la qualité et la rapidité des propositions.
Mask RCNN prédit en outre les masques d'objets en ajoutant une branche parallèle, permettant au modèle d'effectuer simultanément la détection d'objets et la segmentation d'instances. Ceci est particulièrement utile dans les applications nécessitant des informations visuelles fines.

Pour simplifier la structure du modèle et les processus informatiques, les architectures de détection d'objets basées sur la régression/classification sont conçues pour prédire les positions et les catégories d'objets directement sur les images, telles que OverFeat [19], la série YOLO [20-25], SSD [26], DSSD. [27] et FSSD [28]. Le principal avantage de ces architectures est leur vitesse de détection élevée, ce qui les rend adaptées aux scénarios de traitement en temps réel. Parmi eux, la série YOLO se démarque . En recadrant le problème de détection comme une tâche de régression unique, il peut prédire simultanément les catégories et les positions de plusieurs objets en un seul passage vers l'avant du réseau. Pour relever efficacement les défis de détection d'objets de différentes tailles et améliorer la capacité du modèle à détecter de petits objets, SSD introduit le concept de cartes de caractéristiques multi-échelles.

Estimation de la profondeur monoculaire. La recherche de la distance entre les objets et la caméra est restée un axe de recherche central dans le domaine de la vision par ordinateur depuis sa création. Dans les approches initiales, l'estimation de la profondeur monoculaire reposait principalement sur la forme à partir de l'ombrage (SFS) et la profondeur à partir de la mise au point/défocalisation (DFF/DFD). SFS déduit la forme de l'objet en fonction des changements d'éclairage sur sa surface [29]. Les techniques DFF/DFD estiment la profondeur en utilisant des informations focalisées et défocalisées dans les images ainsi que des paramètres d'étalonnage de la caméra [30]. L'hypothèse fondamentale est que les parties focalisées de l'image sont plus claires, tandis que les parties floues deviennent progressivement floues. Bien qu'efficaces dans des scénarios spécifiques, ces méthodes reposent souvent sur des hypothèses de scène supplémentaires et affichent des performances médiocres lorsqu'elles sont confrontées à des scènes présentant une profondeur de champ importante.

Avec les progrès de la technologie d'apprentissage automatique, les chercheurs ont commencé à considérer le problème d'estimation de la profondeur d'un seul pixel comme un problème d'apprentissage probabiliste basé sur des champs aléatoires. Par exemple, l'optimisation des cartes de profondeur à l'aide du champ aléatoire de Markov (MRF) [8,31] et la modélisation des probabilités a posteriori avec le champ aléatoire conditionnel (CRF) pour l'estimation de la profondeur [9]. La puissance de calcul améliorée des unités de traitement graphique (GPU) et la disponibilité d'ensembles de données d'images à grande échelle ont favorisé l'apprentissage en profondeur, ouvrant la voie à de nouvelles orientations de recherche en matière d'estimation en profondeur.

Les techniques d'apprentissage en profondeur nécessitent généralement des données approfondies réelles comme étiquettes de formation. Ces techniques mappent directement les pixels aux valeurs de profondeur en construisant des réseaux neuronaux convolutifs (CNN). Réf. [32,33] ont été les premiers à appliquer les CNN dans le domaine de l'estimation de la profondeur. Ils ont utilisé une stratégie de réseau multi-échelle. Un réseau mondial d'estimation grossière fournit des estimations initiales de distance. De plus, un réseau de raffinement local optimise les détails. Ils ont introduit une fonction de perte invariante à l'échelle pour gérer les erreurs. Études ultérieures

Machine Translated by Google

ont encore amélioré la précision de l'estimation en affinant les structures de réseau [29, 34–36] et en intégrant des informations auxiliaires [37, 38]. Certaines recherches ne s'appuient pas sur une grande quantité de données de profondeur étiquetées. Au lieu de cela, ils utilisent des séquences vidéo ou des images stéréo pour dériver automatiquement des cartes de disparité et des informations de profondeur à l'aide d'algorithmes d'apprentissage en profondeur. Par exemple, Réf. [39] traitent la vue gauche à l'aide d'un réseau neuronal convolutif. Cela génère une carte de disparité. Ensuite, ils reconstruisent la vue de gauche en la combinant avec la vue de droite grâce à une cartographie inverse. L'erreur de reconstruction est utilisée comme signal de supervision pour la formation. Réf. [40] traite simultanément les vues gauche et droite pour optimiser la génération de cartes de disparité, permettant une estimation précise de la profondeur même lorsque seules des images monoculaires sont utilisées pendant les tests. De plus, Réf. [41] dérive la pose et la profondeur de séquences vidéo d'images consécutives, démontrant l'efficacité de la combinaison de plusieurs modèles de réseau pour la reconstruction de vues. Bien que ces méthodes atteignent de bonnes performances, elles entraînent un coût de calcul important.

Des progrès significatifs ont été réalisés dans la détection d'objets 2D et l'estimation de la profondeur monoculaire. Mais les deux restent largement séparés dans la recherche, sans qu'aucune intégration effective ne soit observée. À l'heure actuelle, les systèmes de détection d'objets n'ont souvent pas la capacité d'estimer la portée. Et le système d'estimation de la profondeur n'intègre pas la capacité de reconnaissance d'objets. Cette séparation suggère un besoin de développement. Une architecture algorithmique holistique est nécessaire. Une telle architecture devrait intégrer la détection d'objets et l'estimation de portée. Cette intégration renforcerait la synergie entre ces deux techniques. Par conséquent, cela optimiserait leurs performances dans des applications pratiques.

3. Méthode

Pour aborder l'intégration de la détection d'objets et de l'estimation de distance, nous concevons et développons une architecture algorithmique. Il comprend trois composants principaux : un détecteur basé sur YOLOv5-RedeCa, un tracker multi-objets et un filtre de changement de saut d'anomalie. Dans les scénarios de conduite autonome, les véhicules rencontrent souvent des environnements complexes et dynamiques avec de multiples objets en mouvement autonome qui peuvent soudainement apparaître, devenir obscurcis ou se chevaucher [21]. Ces situations imposent des exigences strictes quant à la précision et à la robustesse de l'algorithme. De plus, en raison de la vitesse élevée de déplacement du véhicule, l'algorithme doit traiter les données des capteurs et réagir en quelques millisecondes pour garantir la sécurité du véhicule. Par conséquent, les systèmes de conduite autonome nécessitent un algorithme de perception d'une grande précision et robustesse.

À ces fins, nous avons conçu le module RedeCa, qui améliore l'architecture de l'algorithme de détection d'objets, améliorant ainsi la précision de la localisation des objets dans les scénarios routiers. De plus, nous intégrons le tracker Bot-Sort. Ce tracker utilise un mécanisme d'association multi-trame. Il améliore la robustesse de l'algorithme en cas d' occlusion d'objet ou de perte temporaire. Ainsi, la méthode peut suivre simultanément plusieurs objets et estimer leurs distances. L'approche évalue également périodiquement la continuité du suivi, surveille les changements significatifs dans l'état de l'objet et vérifie la stabilité du processus de suivi. Pour améliorer la précision et la robustesse de l'estimation de la distance, nous intégrons également un filtre de changement de saut d'anomalie. Le filtre adoucit efficacement la variation de distance de l'objet et élimine les anomalies potentielles causées par des changements soudains dans la taille de la zone de détection. Ainsi, cela peut améliorer la fiabilité de la mesure de distance. L'architecture globale est illustrée à la figure 3.

En implémentant YOLOv5-RedeCa, notre méthode améliore la précision de la reconnaissance des objets et affine la précision du cadre de délimitation sur les images vidéo. De plus, nous calculons les distances entre les objets et la caméra à l'aide d'un modèle d'imagerie physique sophistiqué.

Pour suivre et mesurer efficacement plusieurs objets, nous intégrons le tracker Bot-Sort. Ce mécanisme d'association multi-trames améliore considérablement la robustesse dans les scénarios d'occlusions ou de perte temporaire d'objets. Même si l'objet disparaît temporairement de la vue dans certaines images, il continue de suivre et de mesurer la distance de manière cohérente. Nous attribuons des identifiants uniques aux objets nouvellement détectés à l'aide d'une séquence incrémentielle. Ensuite, il utilise le Bot-Sort pour les faire correspondre aux objets existants, en distinguant ceux qui ont

Machine Translated by Google

nouvellement apparus et ceux déjà suivis. Pour les objets dont la correspondance est réussie, leurs informations d'état sont mises à jour et les identifiants d'origine sont conservés. À l'inverse, les nouveaux objets se voient attribuer de nouveaux enregistrements de suivi et identifiants. Si un objet n'est pas détecté dans la trame actuelle, son entrée est temporairement conservée. Si l'objet ne réapparaît pas dans un délai prédéterminé, il sera supprimé de la liste de suivi.

Désormais, la plupart des méthodes de télémétrie monoculaire se concentrent principalement sur la précision des images individuelles, négligeant la corrélation des changements de distance entre des images consécutives dans le domaine temporel. Par conséquent, nous proposons une stratégie d'analyse de données multi-frames, qui intègre le filtrage de Kalman. Il améliore non seulement la précision et la robustesse de l' estimation de la distance, mais facilite également l'analyse détaillée des modèles de mouvement de l'objet et des tendances des changements de distance. Le filtrage de Kalman adoucit les variations de distance en analysant les changements dans le même objet sur des images consécutives. Il élimine également les erreurs potentielles causées par des changements brusques dans la taille des boîtes de détection d'une seule image.

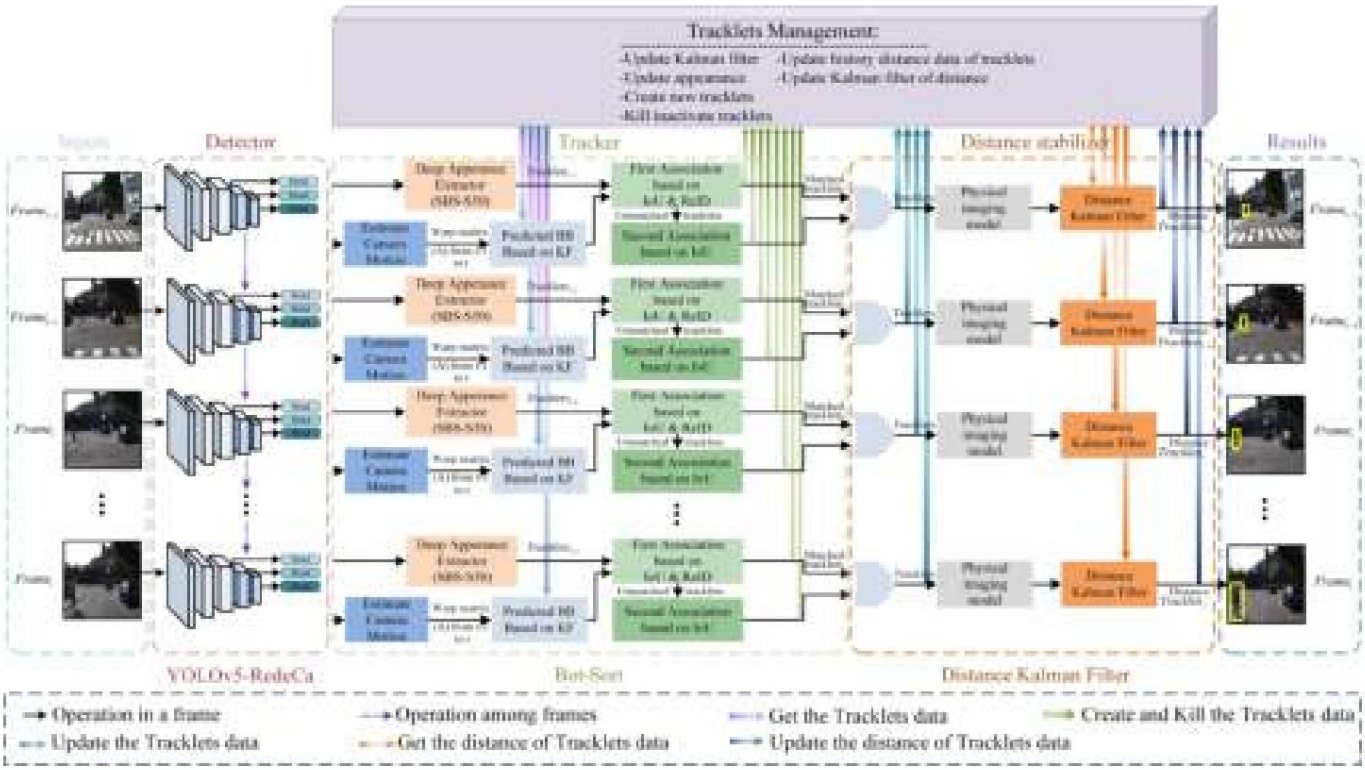


Figure 3. Le graphique de l'architecture globale.

3.1. Détection d'objets

Pour garantir une reconnaissance précise des objets et une extraction précise du cadre de délimitation dans chaque image vidéo, nous avons utilisé l'algorithme de détection d'objets YOLOv5. Il sert de cadre de base à notre module de détection, qui est basé sur des réseaux neuronaux convolutifs profonds . YOLOv5 prédit la classe et la position des objets, c'est-à-dire les cadres de délimitation, directement à partir de l'image d'entrée en un seul passage. Par rapport aux méthodes de détection en deux étapes , qui extraient d'abord les régions candidates puis les classent, YOLOv5 améliore considérablement la vitesse et l'efficacité de la détection. Il utilise un réseau convolutif profond pour extraire des caractéristiques des images, faisant progressivement ressortir des caractéristiques de plus en plus complexes [42].

Il améliore sa capacité à reconnaître divers objets. En intégrant un Feature Pyramid Network (FPN), YOLOv5 combine des cartes de caractéristiques de différents niveaux, améliorant ainsi ses capacités de détection sur une gamme de tailles d'objets.

Compte tenu de la diversité des tailles d'objets dans les scènes routières, de la précision de la détection des objets et des exigences spécifiques du trafic routier, nous avons amélioré l' architecture du réseau YOLOv5. Tout d'abord, nous avons intégré le module RedeCa dans les blocs résiduels. Cela permet une détection plus précise des objets plus petits dans des conditions d'éclairage variables et

Machine Translated by Google

changements de temps. Ensuite, nous avons remplacé les convolutions traditionnelles dans les blocs résiduels par des convolutions séparables en profondeur. Ce changement réduit le nombre de paramètres dans le réseau et améliore les performances en temps réel. L'architecture du réseau YOLOv5-RedeCa est illustrée à la figure 4.

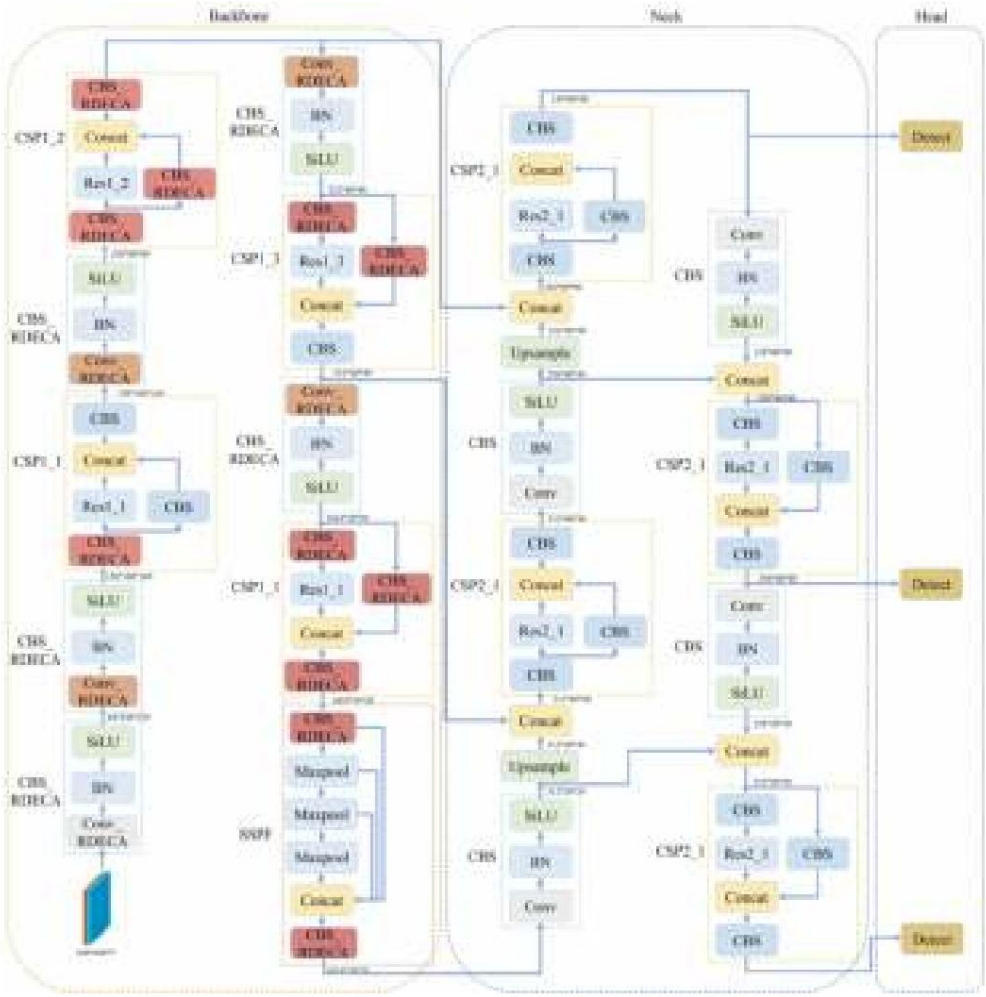


Figure 4. Le diagramme d'architecture du réseau YOLOv5-RedeCa.

Module RedeCa

YOLOv5 a démontré des performances exceptionnelles dans un large éventail de scénarios de détection. Cependant, l'environnement routier complexe exige une approche polyvalente pour s'adapter aux divers types et tailles d'objets de circulation. Pour relever ce défi, nous avons optimisé la structure du réseau de YOLOv5, notamment en concevant le module RedeCa pour améliorer la précision de la reconnaissance des objets de trafic de différentes tailles. Comme le montre la figure 5, le module RedeCa est basé sur un bloc résiduel. Il intègre une séquence de blocs de convolution résiduels séparables en profondeur et de modules ECA pour améliorer les capacités d'extraction de fonctionnal

Les convolutions séparables en profondeur réduisent considérablement le nombre de paramètres et la charge de calcul dans les modèles. Ceci est réalisé en décomposant les convolutions standard en deux opérations plus simples : les convolutions en profondeur et les convolutions ponctuelles. Le processus est détaillé dans la figure 6. Il implique d'abord d'appliquer une convolution en profondeur indépendamment à chaque canal d'entrée. Ensuite, la convolution ponctuelle agrège ces sorties à l'aide de noyaux de convolution 1 × 1. Cette approche réduit considérablement le nombre de paramètres et les exigences de calcul, réduisant ainsi l'utilisation de la mémoire et la consommation d'énergie. Par conséquent, cela rend le modèle plus adapté au déploiement sur des appareils aux ressources limitées.

Machine Translated by Google

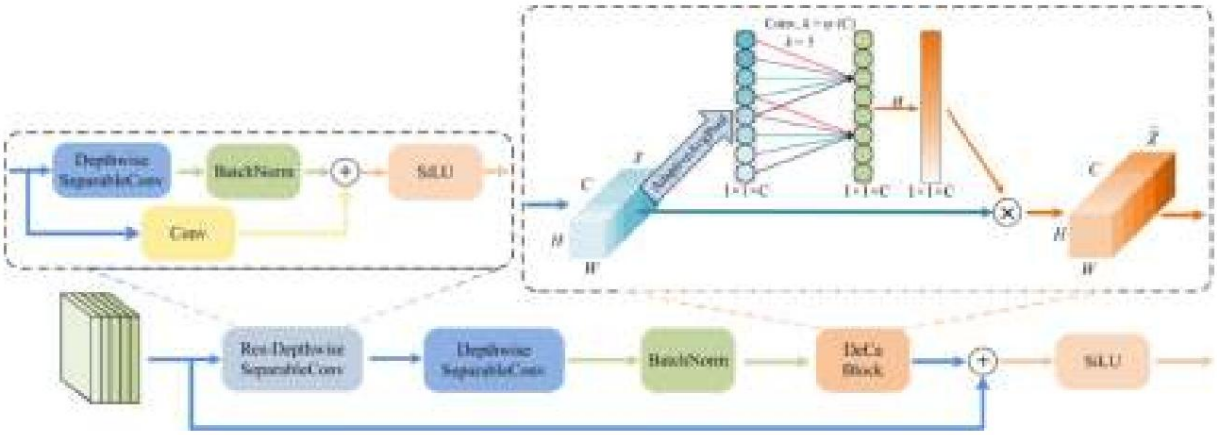


Figure 5. Le graphique de la structure RedeCa.

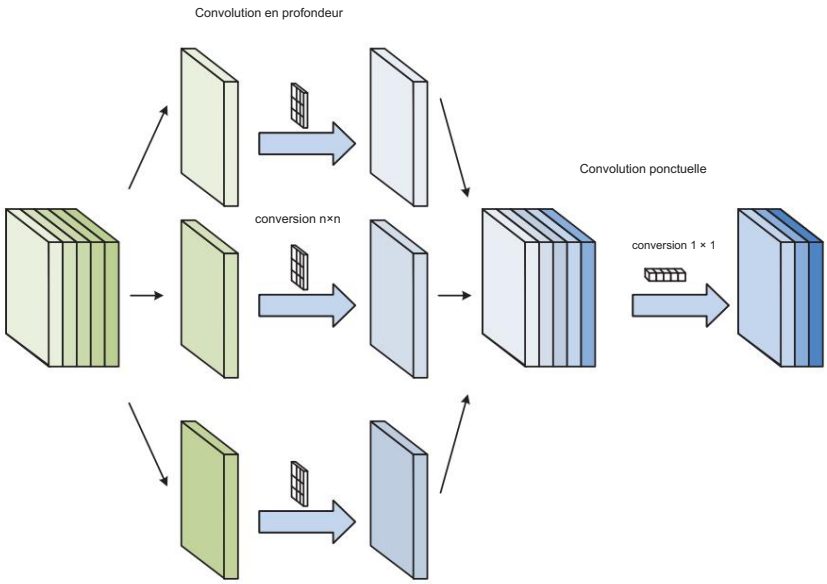


Figure 6. Le graphique de la structure convolutive séparable en profondeur.

Les convolutions séparables en profondeur minimisent le risque de surajustement, ce qui est particulièrement crucial lors de la formation de modèles sur des données limitées.

En réduisant le nombre de paramètres, la formation devient plus simple et la probabilité Le surapprentissage est réduit. Il améliore la capacité de généralisation du modèle dans le monde réel applications. La complexité informatique associée aux convolutions séparables en profondeur est détaillée ci-dessous.

Convolution en profondeur :

$$ParamDC = K \times K \times Cin \quad (1)$$

$$FLOPSDC = Hout \times Wout \times K \times K \times Cin \quad (2)$$

Convolution ponctuelle :

$$ParamPC = Cin \times Cout \quad (3)$$

$$FLOPSPC = Hout \times Wout \times Cin \times Cout \quad (4)$$

Machine Translated by Google

Convolutions séparables en profondeur :

$$\text{ParamDW} = \text{ParamDC} + \text{ParamPC} \tag{5}$$

$$\text{FLOPSDW} = \text{FLOPSDC} + \text{FLOPSPC} \tag{6}$$

où ParamDC quantifie le nombre de paramètres associés à la convolution en profondeur, et FLOPSDC délimite les exigences de calcul requises pour la convolution en profondeur . De manière correspondante, ParamPC spécifie le nombre de paramètres pour la convolution ponctuelle, tandis que FLOPSPC caractérise ses exigences de calcul. De plus, ParamDW indique le nombre de paramètres dans une convolution séparable en profondeur, FLOPSDW élucidant les exigences de calcul pour ce type de convolution.

Le module RedeCa est initié avec un bloc de convolution séparable en profondeur qui intègre les principes d'un réseau résiduel. Il utilise le mappage d'identité pour améliorer l' efficacité de l'apprentissage des couches de réseau profond. Il combine l'efficacité élevée des paramètres des convolutions séparables en profondeur avec la capacité d'apprentissage rapide des connexions résiduelles, améliorant ainsi la capacité d'extraction de caractéristiques du module. Ensuite, un bloc de convolution standard séparable en profondeur est intégré pour réduire efficacement la complexité et les exigences de calcul du modèle. Enfin, le module deca ajuste les dépendances entre les canaux , optimisant dynamiquement les réponses des fonctionnalités pour améliorer la précision de la détection

La formulation mathématique du module RedeCa est la suivante :

$$F^{\text{Rés}}_{\text{ConvDW}} = \text{SiLU}(\text{BN}(\text{DWConv}(F \quad)) + \text{Conv}(F \quad)) \tag{7}$$

$$\text{FDWConv} = \text{BN}(\text{Point par point}(\text{En profondeur}(F^{\text{Rés}}_{\text{DWConv}}))) \tag{8}$$

$$F_{\text{RedeCa}} = \text{SiLU}(\text{FDWConv} \times \sigma(\text{Conv}(\text{AdaptAvgPool}(\text{FDWConv}))) + F \quad) \tag{9}$$

où F^{*} représente l'entrée de la carte de caractéristiques de la couche précédente.

3.2. Améliorer la robustesse de l'association multi-trames dans l'estimation de distance

Dans la détection d'objets et l'estimation de distance dans des scènes de trafic routier, il ne suffit pas d'opérer uniquement sur un seul objet. Dans les applications pratiques, il est nécessaire d'estimer avec précision la distance de plusieurs objets simultanément. Et ces objets peuvent subir des apparitions soudaines, des occlusions, des chevauchements ou des disparitions. La méthode proposée intègre le tracker Bot-Sort, attribuant un identifiant unique à chaque objet dans chaque image, facilitant ainsi l'identification et le suivi efficaces des objets. Bien que les algorithmes de télémétrie monoculaire existants aient amélioré la précision sur des images individuelles, ils négligent souvent la cohérence des changements de distance pour le même objet sur des images consécutives. Ignorer cette cohérence peut entraîner des fluctuations dans les mesures de distance, en particulier lorsque la taille de la boîte englobante de la détection d'objets change radicalement sur une courte période. Notre méthode améliore la précision et la robustesse de l'estimation de la distance en intégrant des techniques de filtrage de Kalman sur les données de séries chronologiques. Cette approche atténue les variations de distances des objets et élimine les anomalies provoquées par des changements soudains dans la taille des boîtes de détection d'une seule image, ce qui se traduit par des performances supérieures dans les scénarios de trafic routier en temps réel.

3.2.1. Tri par robot

Dans le domaine de l'analyse visuelle du trafic routier, la simple détection et l'estimation de la distance d'objets individuels ne suffisent pas. L'élément primordial dans ce domaine est la capacité de mesurer avec précision les distances de plusieurs objets au sein d'une scène et d'attribuer des identifiants distincts à chacun pour un suivi et une différenciation efficaces. Notre méthode intègre le tracker Bot-Sort, un algorithme avancé qui identifie et analyse efficacement chaque objet dans les images vidéo, identifiant ainsi de nouveaux objets à suivre. La méthodologie de l'algorithme 1 est définie sous forme de pseudocode [43].

Machine Translated by Google

Algorithme 1 Flux de travail du système de suivi d'objets basé sur une trame

```
Entrée : Images vidéo
Sortie : trajectoires d'objets suivies pour chaque image
de la vidéo, faites
    Détecter des objets potentiels à l'aide de YOLOX
    Estimer la matrice de transformation du mouvement de la caméra à partir de l'image précédente
    Extraire les fonctionnalités des objets détectés à l'aide du modèle SBS-S50
    Prédire les emplacements des objets dans l'image actuelle à l'aide du filtre de Kalman
    Première association basée sur les scores IoU et ReID fusionnés
Faites correspondre les détections actuelles avec les tracklets existants
    Deuxième association pour des tracklets inégalés basés sur IoU
Mettre à jour les informations sur l'état des tracklets
    Créez de nouveaux tracklets et attribuez de nouveaux identifiants uniques
Supprimer les tracklets inactifs s'ils ne sont pas détectés dans un certain délai
    (Facultatif) Interpoler les parties manquantes dans les tracklets
fin pour
retour Trajectoires terminées pour tous les objets
```

BoT-SORT se présente comme un système de suivi multi-objets supérieur qui améliore considérablement la précision du suivi grâce à l'intégration synergique des données de mouvement et d'apparence visuelle. Le système exploite des filtres de Kalman avancés ainsi que des techniques de compensation du mouvement de la caméra pour gérer efficacement la dynamique du monde réel. Il fusionne de manière distinctive l'intersection sur union (IoU) avec les mesures de distance cosinusoïdale des algorithmes de réidentification (ReID) pour établir des associations d'objets cohérentes et fiables, en particulier dans des environnements densément dynamiques.

3.2.2. Identification et maintenance des objets

Notre méthode intègre la logique suivante pour l'identification et la maintenance des objets. Premièrement, pour les objets nouvellement détectés, le procédé attribue à chaque objet un identifiant unique via une séquence incrémentielle pour différencier les différents objets de suivi. Par la suite , la méthode applique l'algorithme Bot-Sort. Il compare les objets nouvellement découverts avec ceux déjà suivis pour déterminer leur statut.

Pour les objets correspondant avec succès, le système met à jour leurs informations de statut dans la liste de suivi, tout en conservant leurs identifiants uniques d'origine inchangés. Les objets nouvellement apparaissant sont créés en tant que nouvelles entrées de suivi et de nouveaux identifiants uniques leur sont attribués. Si un objet suivi n'est pas détecté dans l'image actuelle, éventuellement en raison d'une occlusion ou d'une sortie du champ de vision, la méthode conserve temporairement son entrée et son identifiant. Si l'objet ne réapparaît pas dans le délai imparti, il sera supprimé de la liste de suivi.

3.2.3. Filtre de changement de saut d'anomalie

Lors de la modélisation du mouvement d'un objet sur le plan image, nous utilisons généralement un filtre de Kalman discret équipé d'un modèle à vitesse constante. Le vecteur d'état de ce filtre est défini comme un septuple, $x = [xc, yc, s, a, \dot{x}c, \dot{y}c, \dot{s}]^T$ où (xc, yc) spécifie les coordonnées 2D du centre de l'objet dans le plan image. Ici, s signifie l'échelle (surface) du cadre de délimitation et a indique son rapport hauteur/largeur. Pour augmenter la précision et la résilience de l'estimation de distance, pour stabiliser les variations de distance des objets et pour traiter les anomalies potentiellement déclenchées par des changements brusques dans la taille des boîtes de détection dans une trame, le vecteur d'état est étendu à un octuple, $x = [xc, yc, une, h, \dot{x}c, \dot{y}c, une\dot{}, \dot{h}]^T$. En conséquence, le vecteur d'état du filtre de Kalman (KF) est défini comme illustré dans l'équation (10), et le vecteur de mesure est délimité dans l'équation (11).

$$xk = [xc(k), yc(k), a(k), h(k), \dot{x}c(k), \dot{y}c(k), \dot{a}(k), \dot{h}(k)]T \quad (dix)$$

$$zk = [zxc(k), zyc(k), za(k), zh(k)]T \quad (11)$$

Machine Translated by Google

Cette approche, qui intègre le filtrage de Kalman dans l'analyse des séries chronologiques, est conçue pour améliorer considérablement la précision et la robustesse de l'estimation de la distance. L' algorithme du filtre de Kalman atténue méthodiquement les fluctuations des distances des objets en effectuant une analyse des données historiques. Il corrige efficacement les anomalies résultant de changements soudains dans la taille des zones de détection au sein de trames individuelles. La prédiction de l'état de l'algorithme est formulée dans les équations (12) et (13), tandis que le mécanisme de mise à jour des observations est détaillé dans les équations (14) à (16).

$$X_{k|k-1} = Fkx\hat{}_{k-1|k-1} + Bkuk \tag{12}$$

$$Pk|k-1 = FkPk-1|k-1F^{T}_{k} + Qk \tag{13}$$

où $x\hat{}_{k|k-1}$ représente l'état prédit, Fk est la matrice de transition d'état, Bk désigne le modèle d'entrée de contrôle, uk est le vecteur de contrôle, Pk|k−1 est la covariance prédite et Qk signifie la covariance du bruit de processus.

$$Kk = Pk|k-1H^{T}_{k}\left(HkPk|k-1H^{T}_{k} + Rk\right)^{-1} \tag{14}$$

$$x\hat{}_{k} = x\hat{}_{k|k-1} + Kk\left(zk - Hkx\hat{}_{k|k-1}\right) \tag{15}$$

$$Pk|k = (I - KkHk)Pk|k-1 \tag{16}$$

où Kk désigne le gain de Kalman, Hk représente la matrice d'observation, zk est l' observation réelle , Rk indique la covariance du bruit d'observation et I est la matrice d'identité.

4. Expériences 4.1.

Ensembles de données

Ensembles de données COCO. L'ensemble de données Common Objects in Context (COCO), développé par l' équipe Microsoft, est un atout essentiel dans la recherche en vision par ordinateur. Il contient plus de 330 000 images richement annotées dans 80 catégories d'objets. En fournissant une référence diversifiée, à grande échelle et stimulante, l'ensemble de données COCO a facilité de vastes activités de recherche [44]. Par conséquent, la méthode que nous proposons a été rigoureusement évaluée sur le jeu de données COCO afin de comparer ses performances avec les principaux algorithmes du domaine. Le tableau 1 résume la configuration expérimentale et le partitionnement de l'ensemble de données, illustrant notre méthode au sein de l'ensemble de données COCO.

Tableau 1. Formation, validation et répartition des ensembles de tests des ensembles de données COCO.

Fractionnement de l'ensemble de données	Nombre d'images	Catégories couvertes
Ensemble d'entraînement	118 287	80 cours
Ensemble de validation	5000	80 cours
Ensemble d'essai	40 670	80 cours

Ensembles de données sur les COV. L'ensemble de données PASCAL Visual Object Classes (VOC) sert de référence cruciale dans le domaine de la vision par ordinateur, prenant en charge des tâches telles que la détection d'objets. Il comprend des annotations pour 20 catégories d'objets différentes, y compris des étiquettes de classe et des cadres de délimitation. La série de défis PASCAL VOC a joué un rôle central dans l'avancement des technologies basées sur la vision [45]. De plus, nous évaluons le YOLOv5 amélioré sur l'ensemble de données VOC et le comparons avec d'autres méthodes populaires. Le tableau 2 fournit une description détaillée du partitionnement de l'ensemble de données VOC.

Machine Translated by Google

Tableau 2. Formation des ensembles de données VOC et répartitions des ensembles de validation.

Fractionnement de l'ensemble de données	Nombre d'images	Catégories couvertes
Ensemble d'entraînement	11 540	20 cours
Ensemble de validation	10 991	20 cours

Ensembles de données KITTI. Le jeu de données KITTI constitue une référence cruciale dans le domaine des piloter la recherche. Il englobe une variété de scénarios de conduite réels, notamment urbains, environnements ruraux et routiers. Il fournit des annotations complètes pour des tâches telles que comme la détection, le suivi et l'estimation de la profondeur d'objets 3D [46]. Nous utilisons l'ensemble de données KITTI pour valider l'exactitude de notre méthode proposée pour l'estimation de distance et démontrer son applicabilité et son efficacité dans des conditions de conduite réalistes.

4.2. Détails d'implémentation

4.2.1. Configuration de la formation

Afin de garantir l'équité et la cohérence de l'effet de formation du modèle, les détails du matériel, des logiciels et de l'environnement expérimental sont présentés dans le tableau 3. Les Les paramètres sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 3. Environnement expérimental.

Environnement	Version
Système opérateur	Ubuntu 20.04
CPU	AMD Ryzen 9 5900HX
GPU	Nvidia GeForce RTX 3080 16G
Environnement de compilation	Python3.9.0
CUDA	12.2
Cadre d'apprentissage profond	Torche 1.13.1
Compilateur	Pycharm 2022.3.1

Tableau 4. Paramètres de formation.

Paramètre	Valeur
Taille du lot	16
Taux d'apprentissage initial	0,1
Taux d'apprentissage final	0,0001
Taille de l'image	640 × 640
Optimiseur	SGD
Ouvriers	2

4.2.2. Fonction de perte

La fonction de perte utilisée dans le modèle YOLOv5-RedeCa est calculée comme suit :

$$L(tp, cible) = \sum_{k=0}^{K} [\alpha_k^{équilibre} \alpha box \sum_{je=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}^{obj}_{kij} LC\ IoU + \alpha obj \sum_{je=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}^{obj}_{kij} Lobj + \alpha cls \sum_{je=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}^{obj}_{kij} Lcls] \quad (17)$$

$$LC\ IoU = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, bgt)}{c^2} + \alpha u \quad (18)$$

où K, S^2, et B représentent la carte des entités en sortie, la cellule et le nombre d'ancres sur chaque cellule, respectivement. αx représente le poids de l'article correspondant. αbox, αobj et Les αcls prennent respectivement les valeurs de 0,05, 0,7 et 0,3. Nous avons basé les valeurs des paramètres de αbox, αobj et αcls sur l'algorithme YOLOv5 original. Utiliser une base de référence stable et reconnue la configuration est essentielle pour une évaluation cohérente des performances. $\alpha_k^{équilibre}$ est utilisé pour équilibrer les poids des cartes d'entités en sortie à chaque échelle, avec une valeur par défaut de [4.0, 1.0, 0.4].

Machine Translated by Google

sont $_{obj}$ indique si la kième carte de caractéristiques de sortie, la ième cellule et la jième boîte d'ancrage $_{kij}$ des échantillons positifs. S'il s'agit d'un échantillon positif, il vaut 1 ; sinon, c'est 0. tp et tgt sont le vecteur prédit et le vecteur de vérité terrain.

La fonction de perte de CIoU est la suivante :

$$L_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{2c} + \alpha\upsilon \quad (19)$$

où b représente les points centraux de la boîte prédite et b gt représente la boîte de vérité terrain . α est le facteur d'équilibre entre la perte causée par le rapport hauteur/largeur et la perte causée par l'IoU. υ est la normalisation de la différence de rapport hauteur/largeur entre la boîte prédite et la boîte de vérité terrain. Ils sont mathématiquement définis comme suit :

$$\rho(b, b^{gt}) = \|b - b^{gt}\|_2 \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\upsilon}{(1 - IoU) + \upsilon} \quad (21)$$

$$\upsilon = \frac{4(\arctan\frac{w_G}{h_G} - \arctan\frac{w_P}{h_P})^2}{\pi^2} \quad (22)$$

Les fonctions de perte pour l'objet et la classe sont définies comme suit :

$$L_{obj}(p_o, p_{IoU}) = BCE_{sig}(o_{jb}(p_o, p_{IoU}; w_{obj}) \quad (23)$$

$$L_{cls}(c_p, c_{gt}) = BCE_{sig}(c_{ls}(c_p, c_{gt}; w_{cls}) \quad (24)$$

où (wG, hG) représente la largeur et la hauteur de la boîte d'objet et (wP, hP) représente la largeur et la hauteur de la boîte prédite po est le score de confiance de l'objet dans la boîte prédite. pIoU est le score de confiance de l'objet dans la case prédite. Les cls BCEsig et BCEsig représentent une perte d'entropie croisée binaire. wobj et $_{cls}$ $_{BCEcls}$ représentent les poids des échantillons positifs.

4.3. Indice d'évaluation

Dans les expériences suivantes, nous évaluons la précision de la détection d'objets par rapport à la précision et stabilité de l'estimation de la distance à l'aide des métriques suivantes. •

Précision : cette mesure est essentielle pour évaluer la précision des modèles de détection d'objets. Il quantifie le rapport entre les instances identifiées avec précision comme objets et tous les cas étiquetés comme objets par le modèle. La formule est définie comme

$$\text{Précision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (25)$$

où TP (True Positives) représente le nombre d'objets correctement détectés, et FP (False Positives) désigne les instances classées par erreur comme objets. • Rappel : le rappel évalue la proportion d'objets réels que le modèle détecte avec succès parmi l'ensemble complet des objets réels. Un rappel plus élevé implique que le modèle est capable d'identifier la plupart des vrais objets, même s'il augmente potentiellement le taux de faux positifs. La formule de rappel est

$$\text{Rappel} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (26)$$

avec FN (False Negatives) indiquant le nombre d'objets qui n'ont pas été détectés. • Précision moyenne (AP) : AP calcule la valeur moyenne de précision sur différents niveaux de rappel. Elle peut être déterminée pour chaque catégorie, et la précision moyenne moyenne (MAP) représente la moyenne des AP dans toutes les catégories. MAP est largement utilisé

Machine Translated by Google

pour évaluer la performance globale dans les tâches impliquant la détection de plusieurs classes d'objets.

$$mAP = \frac{1}{cales} \sum_{je=1}^{Des\ classes} \int_0^1 P(R)d(R) \quad (27)$$

• Écart type (SD) : l'écart-type sert de mesure statistique pour quantifier l'étendue de variation ou de dispersion par rapport à la moyenne au sein d'un ensemble de données. Dans le domaine de l'analyse dans le domaine temporel, il est essentiel d'évaluer avec précision la proximité des estimations de distance. Dérivé de divers algorithmes de télémétrie monoculaire vers les vraies valeurs, ainsi que pour mesurer leur dispersion. Le calcul de l'écart type est défini par le formule suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{je=1}^{N} (f(xi) - \mu i)^2} \quad (28)$$

où σ désigne SD, f(xi) représente la distance estimée à l'instance temporelle i, et μi correspond à la valeur réelle à cette instance. Cette mesure est cruciale pour évaluer la fiabilité et précision de ces algorithmes dans des applications du monde réel.

4.4. Expérience de comparaison

Nous avons développé une méthode YOLOv5 améliorée, spécifiquement optimisée pour la détection petits objets dans des scènes routières sous diverses conditions d'éclairage et météorologiques. Évaluer les performances de notre méthode en termes de représentation des caractéristiques et de traitement temps réel capacités, nous avons mené une série d'expériences sur les ensembles de données COCO et VOC. Notre des méthodes améliorées, désignées selon l'échelle par Ours-s, Ours-m et Ours-l, ont été par rapport à plusieurs méthodes de détection d'objets de pointe.

Nous avons utilisé Precision, mAP et Recall comme principales mesures de performances. En plus, nous avons considéré la complexité en évaluant le nombre de paramètres (Params) et d'opérations en virgule flottante par seconde (FLOPS). Nous avons effectué une analyse comparative de différents méthodes sur les jeux de données COCO et VOC, garantissant la robustesse du modèle expérimental conception et la validité de l'analyse des données. Les résultats sont présentés dans le document ci-joint Tableau 5.

Tableau 5. Résultats de détection de différents algorithmes sur les ensembles de données COCO et VOC.

Méthode	COCO VOC Précision (%) mAP@.5 (%) Rappel (%) Précision (%) mAP@.5 (%) Rappel (%)						Paramètres (M)	flops (G)
SSD	50,7	45,1	38,8	31,4	54,7	57,3	26,3	65,7
R-CNN plus rapide	53,1	48,0	46,0	34,1	57,5	54,7	60,4	93,6
Masque-RCNN	51,9	48,0	45,7	33,9	57,2	69,1	63,4	147,0
YOLOv5	63,5	54,3	52,1	69,4	60,3	52,9	7,1	16.1
YOLOv5m	70,4	61,3	55,4	82,5	74,3	67,2	21,0	48,5
YOLOv5l	72,9	64,0	59,7	82,5	75,4	69,3	46,2	108,6
YOLOv6	64,7	52,8	46,2	65,3	58,3	51,6	18,5	45.3
YOLOv7	65,8	47,6	49,5	66,8	58,3	52,5	6,1	13.2
YOLOv8	68,1	56,3	53,1	68,8	56,5	53,0	11,2	28,8
YOLOv9	67,1	55,7	50,7	66,7	61,7	54,1	9,6	38,8
YOLOv10s	66,3	57,2	51,8	68,4	60,7	56,1	8,1	24.9
Le nôtre	67,2	55,0	51,3	67,0	57,5	53,5	6,7	13.2
Le nôtre-m	71,6	61,5	57,9	81,9	77,5	73,4	17,2	34,6
Le nôtre-l	73,6	64,4	60,1	82,5	80,0	76,0	34,3	70,4

Les résultats expérimentaux sur l'ensemble de données COCO montrent que notre modèle Ours-m optimisé atteint 71,6 % de précision, 61,5 % de mAP et 57,9 % de rappel. Ces résultats sont les meilleurs parmi toutes les méthodes utilisant des ressources informatiques similaires. Sur l'ensemble de données VOC, le modèle a excellé, enregistrant 77,5 % de mAP@.5 et 73,4 % de rappel. Notamment, malgré le fait qu'il y ait moins paramètres que le modèle YOLOv5 à l'échelle équivalente, Ours-s, Ours-m et Ours-l surpassés

Machine Translated by Google

d'autres méthodes en Precision et mAP. Cela démontre notre réussite dans l'amélioration des performances tout en optimisant l'efficacité informatique.

Par rapport au SSD et au Faster R-CNN, Ours-m a démontré des avantages significatifs sur les ensembles de données COCO et VOC. Il s'est avéré particulièrement efficace en Rappel pour la détection de petits objets. Par exemple, sur l'ensemble de données COCO, le rappel de Ours-l était 21,3 % supérieur à celui du SSD et 14,1 % supérieur à celui de Faster R-CNN, soulignant l'efficacité du module RedeCa pour améliorer les capacités de rappel.

Bien que Mask-RCNN soit conçu pour la segmentation d'instances, le modèle Ours-l excelle dans les tâches de détection d'objets. Sur l'ensemble de données VOC, il a atteint un mAP@.5 de 80,0 %, contre 57,2 % pour Mask-RCNN. Cela souligne que notre modèle amélioré offre des performances de détection exceptionnelles, même dans les domaines spécialisés par Mask-RCNN.

Nous avons également contrôlé la complexité du modèle tout en recherchant des performances plus élevées. Par rapport au YOLOv5 original, la série Ours a démontré une détection supérieure des petits objets dans des environnements complexes avec moins de paramètres. Sur l'ensemble de données COCO, Ours-l a amélioré mAP et Recall de 0,4 % chacun par rapport à YOLOv5l. Nos méthodes surpassent les méthodes existantes dans les indicateurs de performance clés tout en maintenant l'efficacité informatique, jetant ainsi une base solide pour des applications pratiques.

Nous avons comparé notre méthode avec les dernières méthodes de détection d'objets de YOLOv6 à YOLOv10 [47-51]. Notre méthode correspond à YOLOv8 et YOLOv9 en termes de précision et surpasse YOLOv6, v8, v9 et v10 en termes d'allègement du modèle et de charge de calcul. Les données présentées dans le tableau 5 ont montré que même si notre modèle atteint une précision comparable à celle des dernières versions de YOLO, il présente toujours des avantages en termes d'allègement du modèle et de charge de calcul. Ces avantages contribuent au déploiement et à l'efficacité opérationnelle de notre méthode dans des applications pratiques.

Le module RedeCa améliore la capacité de notre méthode à représenter les caractéristiques, notamment en traitant avec précision les informations de contour et de détail, ce qui est crucial pour la détection de petits objets . Il augmente également l'adaptabilité aux différentes conditions d'éclairage et météorologiques, renforçant ainsi la robustesse dans des environnements complexes.

Dans les scénarios de trafic routier, les performances en temps réel sont cruciales. Nous avons évalué notre méthode par rapport aux méthodes populaires en termes de FPS et de nombre de paramètres, comme détaillé dans le tableau 5. Le nombre de paramètres et la complexité de calcul de notre méthode sont nettement inférieurs à ceux de Faster R-CNN et Mask-RCNN. Par rapport à la référence YOLOv5, notre méthode atteint des performances comparables tout en réduisant à la fois le nombre de paramètres et la complexité de c

Les résultats expérimentaux montrent qu'en ajoutant le module RedeCa à YOLOv5, nous améliorons considérablement la précision de la détection des petits objets tout en maintenant des taux de rappel élevés. Ces résultats soutiennent fortement une exploration plus approfondie des méthodes d'apprentissage profond pour la détection de petits objets dans des environnements complexes, confirmant l'efficacité et le potentiel de nos améliorations.

Pour valider la précision et la robustesse supérieures de notre méthode, nous avons effectué une analyse comparative quantitative et qualitative complète. Nous avons comparé notre méthode avec les méthodes de mesure de distance monoculaires populaires dans des scénarios de trafic routier. Les résultats sont présentés dans la figure 7.

Comme le montre la figure 7, notre méthode de mesure de distance monoculaire réduit efficacement les erreurs potentielles causées par des changements soudains dans la taille du cadre de détection. Cela conduit à une dispersion réduite des mesures de distance, garantissant qu'elles restent plus cohérentes avec les distances réelles au fil du temps.

Nous avons également mené une analyse qualitative pour comparer notre méthode aux méthodes traditionnelles. Contrairement aux méthodes qui génèrent des cartes de profondeur pour l'image entière afin d'obtenir les distances des objets, notre méthode détecte les objets et mesure leurs distances simultanément, améliorant ainsi l'efficacité. Les résultats de mesure de distance sont présentés à la figure 8.

Machine Translated by Google

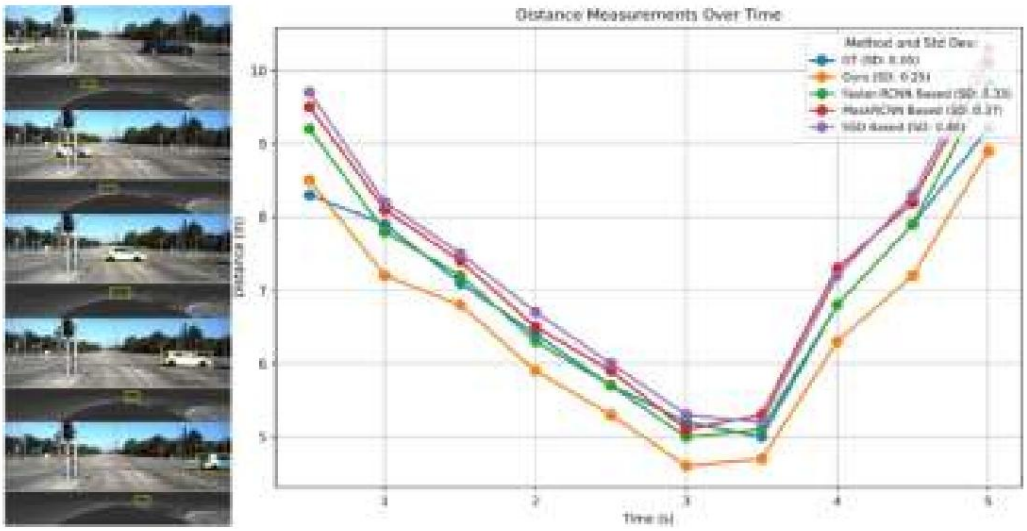


Figure 7. Résultats statistiques et calculs d'écart type de différentes distances monoculaires méthodes de mesure. L'écart type de notre méthode est de 0,25. L'écart type de Le RCNN plus rapide est de 0,33. L'écart type du masque R-CNN est de 0,37. L'écart type du SSD est de 0,40.



(un) (b) (c) (d)

Figure 8. Les résultats de visualisation de différentes méthodes de mesure de distance monoculaire. (a) est le vérité terrain. (b) est le résultat basé sur Faster R-CNN. (c) est le résultat basé sur YOLOv5. (d) est-ce que résultat basé sur YOLO-RedeCa.

Machine Translated by Google

4.5. Expérience d'ablation

Nous avons adopté la méthode expérimentale d'ablation pour évaluer l'impact de différents modules sur les performances de détection du modèle YOLOv5m sur l'ensemble de données VOC. L'expérimental les résultats sont présentés dans le tableau 6. Nous étudions l'effet de la convolution séparable en profondeur (DW) sur les performances du modèle. De plus, nous examinons l'impact d'un canal efficace attention (ECA). Nous explorons également la combinaison directe de DW et ECA. Enfin, nous évaluons les performances du module RedeCa.

Tableau 6. Résultats de détection à l'aide de différents modules sur l'ensemble de données VOC.

Méthode	DW ECA RedeCa (DW + ECA) Précision (%) mAP (%) IOU (%) Params (M) FLOPS (G)					
YOLOv5m		82,5	74,3	67,2	21,0	48,5
YOLOv5m		70,5	62,9	38,4	9,1	18.3
YOLOv5m		82,7	76,3	74,1	21,8	48,6
YOLOv5m		79,3	74,6	71,3	20,8	47,6
YOLOv5m + RedeCa		81,9	77,5	73,4	17,2	34,6

Comme le montre le tableau 6, le modèle de référence YOLOv5m a atteint une précision de 82,5 %, mAP de 74,3 % et IOU de 67,2 % sur l'ensemble de données VOC. Il contenait 21,0 millions de paramètres et 48,5 GFLOPS.

Après avoir ajouté les convolutions séparables en profondeur (DW) au modèle de base, la précision a diminué à 70,5 %, la mAP à 62,9 % et l'IOU a considérablement diminué à 38,4%. Cependant, le nombre de paramètres et de FLOPS a été réduit à 9,1 millions et 18.3 GFLOPS, respectivement. Cela indique que même si le module DW réduit efficacement complexité du modèle, cela a un impact négatif sur les performances de détection.

L'intégration du module Efficient Channel Attention (ECA) a entraîné une légère amélioration de la précision à 82,7 %, augmentation du mAP à 76,3 % et augmentation significative du Reconnaissance de dette à 74,1 %. Le nombre de paramètres et de FLOPS a légèrement augmenté, démontrant que le module ECA améliore les performances de détection sans augmenter significativement la charge de calcul.

Utilisation de convolutions séparables en profondeur (DW) et d'une attention efficace des canaux (ECA) directement, le modèle a constaté de légères améliorations de la précision moyenne moyenne (mAP) et Intersection sur Union (IoU). Mais l'augmentation a été minime et il n'y a pas eu d'augmentation significative. réduction des paramètres du réseau et de la charge de calcul. Cependant, en efficace en intégrant DW et ECA dans le module RedeCa, la précision du modèle a légèrement diminué à 81,9 %, mais le mAP a augmenté à 77,5 % et l'IoU à 73,4 %, tandis que les paramètres et FLOPS ont été réduits à 17,2 M et 34,6 G, respectivement. Cela indique que l'utilisation du module RedeCa peut équilibrer les performances de détection et la complexité du modèle à certains dans une certaine mesure, fournissant une solution efficace pour les applications de détection d'objets en temps réel.

Vérifier que l'utilisation d'un filtre de saut d'anomalie permet de lisser les variations de distance et éliminer les erreurs potentielles causées par des changements soudains dans la taille du cadre de détection, nous avons procédé à une analyse comparative. Nous avons comparé l'architecture de l'algorithme avec celle anomalie saute le filtre à celui sans lui.

Comme le montre la figure 9, l'utilisation efficace d'un filtre de Kalman intégré à la série chronologique élimine les erreurs potentielles causées par des changements soudains dans la taille du cadre de détection. Ce réduit la dispersion des mesures de distance, les rendant plus cohérentes avec le distances réelles au fil du temps.

Machine Translated by Google

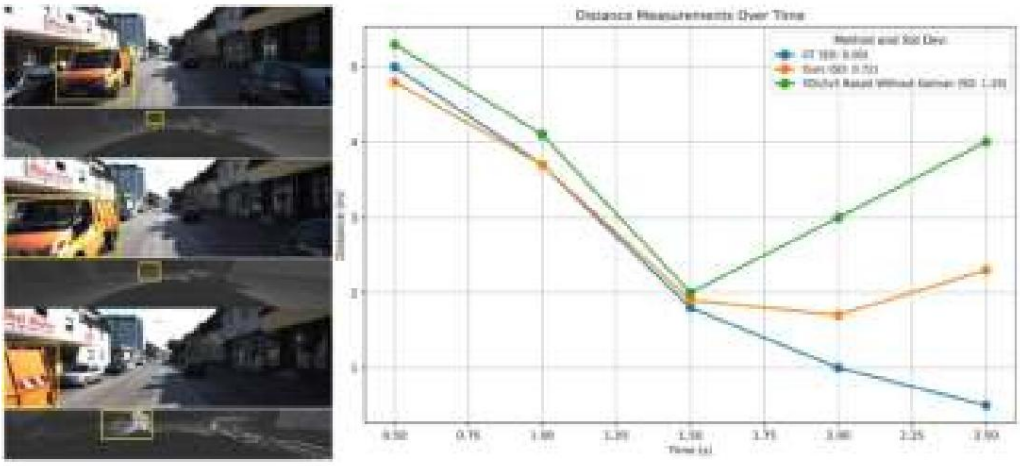


Figure 9. L'impact de l'utilisation du filtrage de Kalman sur les fluctuations de l'estimation de la distance. L'écart type de notre méthode est de 0,72. L'écart type pour le modèle basé sur YOLOv5-RedeCa
méthode sans utilisation du filtrage de Kalman est de 1,29.

5. Conclusions

Notre réseau amélioré de détection d'objets fonctionne parfaitement sur l'ensemble de données COCO. Il atteint respectivement une précision de 71,6 %, une précision moyenne moyenne de 61,5 % (mAP@.5) et un rappel de 57,9 % . Ces résultats sont meilleurs que les modèles de comparaison avec les mêmes ressources informatiques. De plus, sur l'ensemble de données VOC, notre réseau amélioré de détection d'objets montre également d'excellentes performances en mAP@.5 et en rappel. Les résultats sont respectivement de 77,5% et 73,4% . En intégrant l'algorithme Bot-Sort, la robustesse de la méthode proposée est considérablement améliorée lorsqu'il s'agit d'occlusion d'objet ou de perte temporaire, de sorte que le système peut suivre et éloigner plusieurs objets en même temps. Dans le même temps, le filtre de saut anormal peut efficacement lisser le changement soudain de portée de l'objet, éliminer l'anomalie potentielle provoquée par la mutation de la taille de la boîte de détection, et ainsi améliorer la fiabilité de la portée.

L'architecture d'algorithme holistique que nous avons conçue et mise en œuvre avec succès comble le fossé traditionnel en matière de recherche entre la détection d'objets 2D et l'estimation de la profondeur monoculaire. Nous combinons les deux techniques en concevant une nouvelle architecture algorithmique. Cela améliore considérablement les performances de détection d'objets et d'estimation de distance dans des environnements dynamiques et complexes. L'intégration de ces technologies optimise non seulement les fonctions respectives, mais améliore également l'efficacité du système dans les applications pratiques. Il a notamment montré un grand potentiel d'application dans le domaine de la surveillance du trafic et de la conduite automatique.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, HL, YM, YD et YY ; méthodologie, HL et YM ; logiciels, HL; validation, HL et YY ; analyse formelle, HL, YY et YM ; enquête, HL; ressources, HL, YD et YM ; conservation de données, HL ; rédaction – préparation du projet original, HL ; rédaction – révision et édition, HL, YM et YY ; visualisation, HL; supervision, YD et YM ; administration de projet, HL; acquisition de financement, YD Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail est principalement soutenu par le projet de contrôle de la fusion de conduite autonome coopérative véhicule-route et parrainé par les projets de recherche universitaire de l'Université de l'Union de Pékin (Nos ZK80202003, ZK90202105), le programme scientifique et technologique de la Commission municipale de l'éducation de Pékin (N° KM202111417007, KM202211417006).

Déclaration de disponibilité des données : l'ensemble de données COCO utilisé peut être obtenu à partir de https://cocodataset. org/ #accueil (consulté le 24 juin 2024). L'ensemble de données VOC peut être obtenu à partir de http://host. robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/ (consulté le 24 juin 2024). L'ensemble de données KITTI peut être obtenu à partir de https://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_object.php?obj_benchmark=3d (consulté le 24 juin 2024). L'architecture de fusion utilisant YOLO-RedeCa et le filtre de changement de saut anormal est disponible

Machine Translated by Google

sur GitHub à https://github.com/Mr-Lv-BUU/The-Fusion-Architecture-Using-YOLO-RedeCa- and-Abnormal-Jumping-Change-Filter.git (consulté le 24 juin 2024).

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Tan, K. ; Wu, J. ; Zhou, H. ; Wang, Y. ; Chen, J. Intégration d'algorithmes avancés de vision par ordinateur et d'IA pour la conduite autonome Systèmes. J. Théorie et pratique. Ing. Sci. 2024, 4, 41-48.
2. Haris, M. ; Glowacz, A. Détection d'objets routiers : une étude comparative des algorithmes basés sur l'apprentissage profond. Electronique 2021, 10, 1932. [Référence croisée]
3. Li, Y. ; Huang, B. ; Chen, Z. ; Cui, Y. ; Liang, F. ; Shen, M. ; Liu, F. ; Xie, E. ; Sheng, L. ; Ouyang, W. ; Shao, J. Fast-BEV : une base de référence rapide et solide pour la perception à vol d'oiseau. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2024, 1-14.
4. Girshick, R. ; Donahue, J. ; Darrell, T. ; Malik, J. Riches hiérarchies de fonctionnalités pour une détection précise des objets et une segmentation sémantique. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Columbus, OH, États-Unis, 23-28 juin 2014 ; pp. 580-587.
5. Diwan, T. ; Anirudh, G. ; Tembhurne, JV Détection d'objets à l'aide de YOLO : défis, successeurs architecturaux, ensembles de données et applications. Multimed. Outils Appl. 2023, 82, 9243-9275. [Référence croisée] [Pub Med]
6. Zhao, ZQ ; Zheng, P. ; Xu, ST; Wu, X. Détection d'objets avec apprentissage profond : une revue. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2019, 30, 3212-3232. [Référence croisée] [Pub Med]
7. Poggi, M. ; Tosi, F. ; Batsos, K. ; Mordohai, P. ; Mattoccia, S. Sur les synergies entre l'apprentissage automatique et la stéréo binoculaire pour l'estimation de la profondeur à partir d'images : une enquête. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2021, 44, 5314-5334. [Référence croisée] [Pub Med]
8. Saxena, A. ; Soleil, M. ; Ng, AY Make3d : apprentissage de la structure d'une scène 3D à partir d'une seule image fixe. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2008, 31, 824-840. [Référence croisée]
9. Karsch, K. ; Liu, C. ; Kang, SB Transfert de profondeur : extraction de profondeur à partir d'une vidéo à l'aide d'un échantillonnage non paramétrique. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2014, 36, 2144-2158. [Référence croisée]
10. Fu, C. ; Yuan, H. ; Xu, H. ; Zhang, H. ; Shen, L. TMSO-Net : Observation multi-échelle adaptative de texture pour la profondeur d'image du champ lumineux estimation. J. Vis. Commun. L'image représente. 2023, 90, 103731. [Réf. croisée]
11. Zou, Z. ; Chen, K. ; Shi, Z. ; Guo, Y. ; Oui, J. Détection d'objets dans 20 ans : une enquête. Proc. IEEE 2023, 111, 257-276. [Référence croisée]
12. Krizhevsky, A. ; Sutskever, I. ; Hinton, classification GE Imagenet avec des réseaux neuronaux convolutifs profonds. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2012, 25, 1097-1105. [Référence croisée]
13. Xiao, Y. ; Tian, Z. ; Yu, J. ; Zhang, Y. ; Liu, S. ; Du, S. ; Lan, X. Une revue de la détection d'objets basée sur l'apprentissage profond. Multimed. Outils Appl. 2020, 79, 23729-23791. [Référence croisée]
14. Lui, K. ; Zhang, X. ; Ren, S. ; Sun, J. Regroupement de pyramides spatiales dans des réseaux convolutionnels profonds pour la reconnaissance visuelle. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2015, 37, 1904-1916. [Référence croisée] [Pub Med]
15. Girshick, R. Fast r-cnn. Dans les actes de la conférence internationale de l'IEEE sur la vision par ordinateur, Santiago, Chili, 7-13 décembre 2015 ; pages 1440 à 1448.
16. Ren, S. ; Lui, K. ; Girshick, R. ; Sun, J. Faster r-cnn : Vers une détection d'objets en temps réel avec des réseaux de proposition de région. Av. Informations neuronales . Processus. Système. 2015, 28, 91-99. [Référence croisée] [Pub Med]
17. Martin, D. ; Fowlkes, C. ; Tal, D. ; Malik, J. Une base de données d'images naturelles segmentées humaines et son application à l'évaluation des algorithmes de segmentation et à la mesure des statistiques écologiques. Dans Actes de la huitième conférence internationale de l'IEEE sur la vision par ordinateur, ICCV 2001, Vancouver, BC, Canada, 7-14 juillet 2001.
18. Dai, J. ; Li, Y. ; Lui, K. ; Sun, J. R-fcn : Détection d'objets via des réseaux entièrement convolutionnels basés sur la région. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2016, 29, 379-387.
19. Sermanet, P. ; Eigen, D. ; Zhang, X. ; Mathieu, M. ; Fergus, R. ; LeCun, Y. Overfeat : reconnaissance, localisation et détection intégrées en utilisant des réseaux convolutifs. arXiv 2013, arXiv : 1312.6229.
20. Redmon, J. ; Divvala, S. ; Girshick, R. ; Farhadi, A. Vous ne regardez qu'une seule fois : détection d'objets unifiée et en temps réel. Dans les actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Las Vegas, NV, États-Unis, 26 juin-1er juillet 2016 ; pp. 779-788.
21. Han, X. ; Chang, J. ; Wang, K. Détection d'objets en temps réel basée sur YOLO-v2 pour les petits objets de véhicule. Procedia Comput. Sci. 2021, 183, 61-72. [Référence croisée]
22. Redmon, J. ; Farhadi, A. YOLO9000 : Mieux, plus rapide, plus fort. Dans les actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et Pattern Recognition, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pages 7263 à 7271.
23. Redmon, J. ; Farhadi, A. Yolov3 : Une amélioration progressive. arXiv 2018, arXiv : 1804.02767.
24. Bochkovskiy, A. ; Wang, CY; Liao, HYM Yolov4 : Vitesse et précision optimales de détection d'objets. arXiv 2020, arXiv :2004.10934.
25. Jocher, G. ; Chaurasia, A. ; Stoken, A. ; Borovec, J. ; Kwon, Y. ; Michael, K. ; Croc, J. ; Wong, C. ; Yifu, Z. ; Montés, D. ; et coll. ultralytics /yolov5 : v6.2 — Modèles de classification YOLOv5, Apple M1, reproductibilité, intégrations ClearML et Deci.ai, v6.2 ; Zenodo : Genève, Suisse, 2022.
26. Liu, W. ; Anguélov, D. ; Erhan, D. ; Szegedy, C. ; Reed, S. ; Fu, CY ; Berg, AC Ssd : Détecteur multibox monocoup. Dans Actes de Computer Vision–ECCV 2016 : 14e Conférence européenne, Amsterdam, Pays-Bas, 11-14 octobre 2016 ; Actes, partie I 14 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016 ; pp. 21-37.

Machine Translated by Google

27. Fu, CY ; Liu, W. ; Ranga, A. ; Tyagi, A. ; Berg, AC Dssd : Détecteur déconvolutionnel à un coup. arXiv 2017, arXiv : 1701.06659.
28. Li, Z. ; Yang, L. ; Zhou, F. FSSD : Détecteur multibox à fusion unique à tir unique. arXiv 2017, arXiv : 1712.00960.
29. Ren, D. ; Yang, M. ; Wu, J. ; Zheng, N. Contraintes de poids normales de surface et gaussiennes pour l'achèvement de la structure en profondeur intérieure. Reconnaissance de modèles. 2023, 138, 109362. [Réf. croisée]
30. Favaro, P. ; Soatto, S. Une approche géométrique de la forme à partir de la défocalisation. IEEETrans. Modèle Anal. Mach. Intell. 2005, 27, 406-417. [Référence croisée] [Pub Med]
31. Liu, B. ; Gould, S. ; Koller, D. Estimation de la profondeur d'une image unique à partir d'étiquettes sémantiques prédites. Dans les actes de la conférence 2010 de l'IEEE Computer Society sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, San Francisco, Californie, États-Unis, 13-18 juin 2010 ; pages 1253 à 1260.
32. Eigen, D. ; Puhrsch, C. ; Fergus, R. Prédiction de carte de profondeur à partir d'une seule image à l'aide d'un réseau profond multi-échelle. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2014, 27, 2366-2374.
33. Kuznietsov, Y. ; Stuckler, J. ; Leibe, B. Apprentissage profond semi-supervisé pour la prédiction de cartes de profondeur monoculaires. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pages 6647 à 6655.
34. Eigen, D. ; Fergus, R. Prédiction de la profondeur, des normales de surface et des étiquettes sémantiques avec une architecture convolutive multi-échelle commune. Dans les actes de la conférence internationale de l'IEEE sur la vision par ordinateur, Santiago, Chili, 7-13 décembre 2015 ; pages 2650 à 2658.
35. Liu, C. ; Yang, G. ; Zuo, W. ; Zang, T. DPDFormer : Un modèle grossier à fin pour l'estimation de la profondeur monoculaire. ACM Trans. Multimed. Calculer. Commun. Appl. 2024, 20, 1-21. [Référence croisée]
36. Li, Z. ; Chen, Z. ; Liu, X. ; Jiang, J. Depthformer : Exploiter la corrélation à longue portée et les informations locales pour un télescope monoculaire précis estimation de la profondeur. Mach. Intell. Rés. 2023, 20, 837-854. [Référence croisée]
37. Jiao, J. ; Cao, Y. ; Chanson, Y. ; Lau, R. Regardez plus en profondeur : estimation de la profondeur monoculaire avec booster sémantique et perte axée sur l'attention. Dans Actes de la Conférence européenne sur la vision par ordinateur (ECCV), Munich, Allemagne, 8-14 septembre 2018 ; pp. 53-69.
38. Miclea, VC; Nedevschi, S. Estimation de la profondeur monoculaire avec une précision améliorée à longue portée pour la perception de l'environnement des drones. IEEETrans. Géosci. Télésens.2021 , 60, 1–15. [Référence croisée]
39. Garg, R. ; Bg, VK; Carneiro, G. ; Reid, I. CNN non supervisé pour l'estimation de la profondeur à vue unique : la géométrie à la rescousse. Dans Actes de Computer Vision–ECCV 2016 : 14e Conférence européenne, Amsterdam, Pays-Bas, 11-14 octobre 2016 ; Actes, partie VIII 14 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016 ; pp. 740-756.
40. Godard, C. ; Mac Aodha, O. ; Bristow, GJ Estimation de la profondeur monoculaire non supervisée avec cohérence gauche-droite. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pp. 270-279.
41. Zhou, T. ; Brun, M. ; Snavely, N. ; Lowe, DG Apprentissage non supervisé de la profondeur et du mouvement de l'ego à partir de la vidéo. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Honolulu, HI, États-Unis, 21-26 juillet 2017 ; pages 1851-1858.
42. Mahaur, B. ; Mishra, K. Détection de petits objets basée sur YOLOv5 dans les systèmes de conduite autonome. Reconnaissance de modèles. Lett. 2023, 168, 115-122. [Référence croisée]
43. Aharon, N. ; Orfaig, R. ; Bobrovsky, BZ BoT-SORT : Associations robustes de suivi multi-piétons. arXiv 2022, arXiv :2206.14651.
44. Lin, TY; Maire, M. ; Appartenir, S. ; Hays, J. ; Perona, P. ; Ramanan, D. ; Dollarar, P. ; Zitnick, CL Microsoft coco : Objets communs en contexte. Dans Actes de Computer Vision–ECCV 2014 : 13e Conférence européenne, Zurich, Suisse, 6-12 septembre 2014 ; Actes, partie V 13 ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2014 ; pp. 740-755.
45. Everingham, M. ; Eslami, SA; Van Gool, L. ; Williams, CK; Winn, J. ; Zisserman, A. Le défi des classes d'objets visuels Pascal : une rétrospective. Int. J. Informatique. Vis. 2015, 111, 98-136. [Référence croisée]
46. Geiger, A. ; Lenz, P. ; Stiller, C. ; Urtasun, R. La vision rencontre la robotique : l'ensemble de données kitti. Int. J.Robot. Rés. 2013, 32, 1231-1237. [Référence croisée]
47. Li, C. ; P'tit.; Jiang, H. ; Weng, K. ; Geng, Y. ; P'tit.; Ke, Z. ; Li, Q. ; Cheng, M. ; Nie, W. ; et coll. YOLOv6 : une détection d'objets en une seule étape cadre pour les applications industrielles. arXiv 2022, arXiv :2209.02976.
48. Wang, C.-Y. ; Bochkovskiy, A. ; Liao, H.-YM YOLOv7 : un sac de cadeaux entraînables établit un nouvel état de l'art pour les détecteurs d'objets en temps réel. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 17-24 juin 2023 ; pages 7464 à 7475.
49. Lou, H. ; Duan, X. ; Guo, J. ; Liu, H. ; Gu, J. ; Bi, L. ; Chen, H. DC-YOLOv8 : Algorithme de détection d'objets de petite taille basé sur une caméra capteur. Électronique 2023, 12, 2323. [CrossRef]
50. Wang, C.-Y. ; Ouais, I.-H.; Liao, H.-YM YOLOv9 : Apprendre ce que vous voulez apprendre à l'aide d'informations de gradient programmables. arXiv 2024, arXiv :2402.13616.
51. Wang, A. ; Chen, H. ; Liu, L. ; Chen, K. ; Lin, Z. ; Han, J. ; Ding, G. YOLOv10 : Détection d'objets de bout en bout en temps réel. arXiv 2024, arXiv :2405.14458.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Une approche de classification du trafic crypté basée sur le chemin Fonctionnalités de signature et LSTM

Yihe Mei [1], Nurbol Luktarhan 2,*, Guodong Zhao [1] et Xiaotong Yang [2]

[1] École de logiciels, Université du Xinjiang, Urumqi 830091, Chine ; 107552204789@stu.xju.edu.cn (YM) ; 107552204851@stu.xju.edu.cn (GZ)
[2] Collège des sciences et de l'ingénierie de l'information, Université du Xinjiang, Urumqi 830046, Chine ; 107552204103@stu.xju.edu.cn
* Correspondance : nurbol@xju.edu.cn

Résumé : La classification du trafic chiffré est un aspect crucial de la sécurité des réseaux. Cependant, les méthodes populaires sont confrontées à plusieurs limites, telles que le recours à l'ingénierie des fonctionnalités et la nécessité d' architectures de modèles complexes pour garantir une classification efficace. Pour relever ces défis, nous proposons une méthode qui combine les fonctionnalités de signature de chemin avec des modèles LSTM (Long Short-Term Memory) pour classer les types de services au sein du trafic chiffré. Notre approche construit des chemins de trafic en utilisant la taille des paquets et les heures d'arrivée. Nous générons des caractéristiques de signature de chemin à différentes échelles en utilisant une technique innovante d'extraction de caractéristiques cumulatives multi-échelles. Ces fonctionnalités servent d'entrées aux réseaux LSTM pour effectuer la classification. Notamment, en utilisant seulement 24 fonctionnalités de paquets séquentiels en conjonction avec les modèles LSTM, notre méthode a obtenu un succès significatif dans la classification des types de services au sein du Les résultats expérimentaux mettent en évidence la supériorité de notre méthode proposée par rapport aux principales approches dans le domaine.

Mots-clés : classification du trafic crypté ; caractéristiques de signature de chemin ; mémoire à long terme et à court terme ; l'apprentissage en profondeur

check for updates

Citation : Mei, Y. ; Luktarhan, N. ; Zhao, G.; Yang, X. Une approche de classification du trafic crypté basée sur les fonctionnalités de signature de chemin et le LSTM. Électronique 2024, 13, 3060. https://doi.org/10.3390/electronics13153060

Rédacteur académique : Martin Reisslein

Reçu : 27 juin 2024
Révisé : 29 juillet 2024
Accepté : 31 juillet 2024
Publié : 2 août 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

À l'ère de la connectivité Internet omniprésente, la classification du trafic réseau est devenue la pierre angulaire de la cybersécurité. L'importance de cette discipline est soulignée par ses applications critiques dans la détection des intrusions, l'analyse des tendances du trafic, la gestion de la qualité de service et l'amélioration de la visibilité du réseau [1]. Avec l'adoption généralisée des technologies de cryptage, le paysage du trafic réseau a radicalement changé à mesure que de plus en plus d'utilisateurs et de fournisseurs de services choisissent de transmettre des informations via un trafic crypté [2].

Le trafic chiffré diffère du trafic non chiffré dans la mesure où il utilise des protocoles de chiffrement pour coder les données transmises entre les appareils, empêchant ainsi les parties non autorisées d'y accéder. Ce cryptage garantit des avantages significatifs en termes de confidentialité et de sécurité en protégeant les informations sensibles contre l'interception et l'exploitation par des acteurs malveillants. Le trafic crypté préserve la confidentialité et l'intégrité des données, des communications et des transactions des utilisateurs, les rendant ainsi infalsifiables. En revanche, le trafic non crypté transmet des données en texte brut, qui peuvent être facilement interceptées et lues par toute personne ayant accès au réseau. Bien que le trafic non chiffré permette une surveillance et une analyse plus simples par les administrateurs réseau, il expose les utilisateurs à un risque plus élevé de violations de données et de violations de la vie privée. Les principaux avantages du trafic non chiffré sont sa simplicité et sa moindre charge de calcul, ce qui peut entraîner une transmission de données plus rapide. Toutefois, les avantages en matière de sécurité du trafic chiffré dépassent de loin ces avantages, ce qui rend le chiffrement essentiel dans l'environnement numérique actuel.

Bien que le trafic crypté protège la vie privée et l'anonymat de la plupart des utilisateurs, il présente simultanément des défis substantiels en matière de cybersécurité [3]. Les criminels exploitent de plus en plus de techniques de cryptage sophistiquées pour mener des activités illégales,

Machine Translated by Google

compromettant la stabilité du cyberespace et constituant des menaces pour la sécurité nationale. Les chercheurs ont besoin de toute urgence de nouvelles méthodes de classification pour relever ce formidable défi.

L'avènement du chiffrement a posé un défi substantiel aux méthodes traditionnelles de classification du trafic [4]. Les techniques qui reposaient autrefois sur l'inspection de la charge utile et la classification basée sur les ports sont désormais devenues inefficaces contre le voile de cryptage [5,6].

Historiquement, le domaine s'est appuyé sur des méthodes statistiques et, plus récemment, sur des algorithmes d'apprentissage automatique pour naviguer dans les complexités de la classification du trafic crypté [7-10]. Ces méthodes comportent cependant leur propre ensemble de défis. Ils nécessitent souvent des efforts considérables d'ingénierie des fonctionnalités et dépendent fortement de la qualité et de la quantité des données disponibles. De plus, bien que pratiques, les conceptions complexes des modèles d'apprentissage profond nécessitent de vastes ressources informatiques et de vastes ensembles de données pour atteindre une précision satisfaisante [4].

De nos jours, les applications réelles de classification du trafic chiffré incluent Cisco Encrypted Traffic Analytics (ETA), Darktrace, Symantec Encrypted Traffic Management (ETM) et Vectra AI. Cisco ETA identifie les logiciels malveillants dans le trafic chiffré à l'aide de la télémétrie réseau et de l'apprentissage automatique. Darktrace utilise la détection d'anomalies basée sur l'IA pour identifier les menaces dans les données cryptées. Symantec ETM déchiffre, inspecte et rechiffre le trafic, en utilisant une inspection approfondie des paquets pour la classification. La plateforme Cognito de Vectra AI utilise l'apprentissage automatique et l'analyse comportementale pour détecter les menaces au sein du trafic chiffré. Ces solutions mettent en évidence la dépendance du secteur à l'égard de l'apprentissage automatique, de l'IA et de l'analyse avancée des réseaux pour une gestion sécurisée et efficace du trafic chiffré.

La fonctionnalité de signature de chemin proposée par Chen [11] a été appliquée avec succès ces dernières années à des domaines tels que l'apprentissage automatique, la reconnaissance de formes et l'analyse de chemin. Cette fonctionnalité a également été récemment introduite dans le domaine de la classification du trafic crypté, où elle a démontré sa faisabilité sur plusieurs ensembles de données [12]. Cependant, la complexité inhérente des caractéristiques de signature de chemin signifie que les résultats de classification ne sont pas toujours satisfaisants. Dans la classification du trafic crypté, le défi consistant à exploiter pleinement les fonctionnalités de signature de chemin pour obtenir des résultats satisfaisants persiste, ce qui nécessite des recherches et des innovations plus approfondies.

Dans cet article, nous introduisons une méthode d'extraction de caractéristiques de signature de chemin cumulatif à plusieurs échelles pour maximiser le contenu informationnel des caractéristiques de signature de chemin. Pour exploiter pleinement le potentiel de ces fonctionnalités, nous avons exploré leur intégration avec des réseaux de neurones profonds. Cette intégration a conduit à des résultats de classification satisfaisants, démontrant l'efficacité de la combinaison des fonctionnalités de signature de chemin avec l'apprentissage profond dans la classification du trafic crypté.

Les principales contributions de cet article sont les suivantes :

1. Nous proposons un classificateur de trafic chiffré qui combine des fonctionnalités de signature de chemin avec un modèle LSTM. Ce classificateur extrait la dynamique complexe et les structures géométriques du trafic chiffré à l'aide des fonctionnalités de signature de chemin et utilise un modèle LSTM pour effectuer la tâche de classification, réduisant ainsi considérablement les ressources de calcul requises pour la classification du trafic.
2. Nous introduisons une méthode d'extraction de caractéristiques cumulatives multi-échelles pour générer des caractéristiques de signature de chemin parfaitement adaptées aux modèles LSTM. Grâce à cette méthode, la précision de la classification du modèle LSTM peut être améliorée de 5 à 30 %, validant ainsi l' efficacité de notre nouvelle approche d'extraction de caractéristiques.
3. Notre méthode proposée permet d'obtenir des résultats de classification compétitifs en utilisant seulement 24 caractéristiques consécutives de longueur de paquet et d'intervalle de temps. Il démontre des précisions de classification de 94,74 %, 90,53 %, 93,86 % et 95,03 % sur les ensembles de données ISCX-VPN, ISCX-nonVPN, ISCX-Tor et ISCX-nonTor, respectivement, prouvant l'efficacité de notre approche.

2. Travaux connexes

2.1. Classification du trafic crypté

La classification du trafic Internet peut être classée en trois domaines principaux :

1. Distinguer le trafic chiffré et non chiffré [3] ; 2. Identifier les applications spécifiques associées au trafic [13] ;

Machine Translated by Google

3. Classification du trafic en fonction de différents types de services. Les types de services font référence à l'objectif du trafic, c'est-à-dire au trafic généré pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. Par exemple, le trafic de transfert de fichiers est généré lorsque les utilisateurs effectuent des opérations de téléchargement sur le réseau, et le trafic de streaming est généré lorsque les utilisateurs utilisent des services multimédias de streaming, comme écouter de la musique ou regarder des vidéos [14].

Cette section résume les méthodes essentielles pour la classification du trafic réseau, classées en fonction des techniques utilisées : basées sur les ports, basées sur la charge utile, la construction d'empreintes digitales, les méthodes statistiques et les modèles d'apprentissage profond.

Basée sur le port : cette méthode, l'une des plus anciennes en matière de classification du trafic réseau, reposait sur des numéros de port fixes attribués par l'IANA (Internet Assigned Numbers Authority) au cours des premiers développements d'Internet. Cette approche a facilité l'association des applications réseau avec leur trafic correspondant via l'analyse des ports, permettant ainsi l'identification du trafic [15]. Cependant, avec la croissance exponentielle des applications réseau et des techniques de ports dynamiques, l'analyse des ports ne s'applique plus à l' environnement réseau actuel [5]. Notre méthode, notamment, ne dépend pas des numéros de ports.

Basé sur la charge utile : pour remédier aux limites de l'analyse des ports, les chercheurs ont proposé des méthodes d'inspection approfondie des paquets (DPI) [6] pour l'identification du trafic. DPI examine la partie données d'un paquet (charge utile) et utilise des signatures connues pour identifier le type de trafic. Le principe de base du DPI est que divers paquets de données de protocole de communication ont certains formats de paquet et que des caractères ou des chaînes spécifiques contenant des informations significatives peuvent être trouvés en extrayant la charge utile des paquets. Ces contenus de charge utile spécifiques servent d'indicateurs pour la reconnaissance du type de trafic [6]. Cependant, cette méthode présente des risques de porter atteinte à la vie privée des utilisateurs, d'entraîner des coûts de calcul élevés et de devenir inefficace lorsqu'il s'agit de trafic crypté [16]. Notre approche évite de s'appuyer sur les informations sur la charge utile.

Construction d'empreintes digitales : Pour remédier aux limites des méthodes de classification du trafic basées sur la charge utile, plusieurs études ont utilisé des informations de champ de protocole non cryptées pour la classification du trafic [3]. Par exemple, T Van Ede et al. [17] utilise des fonctionnalités telles que le type de périphérique, les détails du certificat, la taille du paquet et les informations de synchronisation pour représenter chaque flux, construisant une bibliothèque d'empreintes digitales grâce à des techniques de clustering et de corrélation croisée pour une classification efficace du trafic. Cependant, ces méthodes s'appuient fortement sur des informations en clair, qui peuvent être facilement falsifiées lors de la transmission, entraînant une perte de signification précise. À l'inverse, notre modèle fonctionne indépendamment des informations en clair contenues dans les paquets de données.

Méthodes statistiques : cette catégorie implique l'extraction manuelle de fonctionnalités telles que la taille et la synchronisation du trafic à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique pour la classification du trafic. Le classificateur Random Forest est un algorithme d'apprentissage automatique classique qui fonctionne en construisant plusieurs arbres de décision pendant la formation et en produisant le modèle de classe pour la tâche de classification. Cette méthode d'ensemble améliore la robustesse et la précision du modèle en atténuant le problème courant de surajustement dans les arbres de décision individuels. Par exemple, VF Taylor et al. [9] utilise un classificateur Random Forest avec des fonctionnalités de taille de paquet pour les tâches de classification. D' autre part, Vinai George Biju [18] a utilisé l'algorithme Support Vector Machine (SVM) pour classer le trafic crypté. SVM est également un algorithme d'apprentissage automatique classique qui fonctionne en trouvant l'hyperplan optimal qui maximise la marge entre les différentes classes dans l'espace des fonctionnalités, fonctionnant exceptionnellement bien dans les espaces de grande dimension. Bien que ces méthodes évitent la nécessité d'une inspection du contenu des paquets, s'adaptant ainsi à la classification du trafic chiffré, elles se heurtent également à des limites. Les caractéristiques statistiques simples ne permettent souvent pas une classification précise, et la dérivation de caractéristiques complexes nécessite des efforts et des ressources considérables. Notre méthodologie s'appuie sur des fonctionnalités statistiques simples pour dériver des fonctionnalités de signature de chemin, enrichissant ainsi le caractère informatif des fonctionnalités sans ingénierie complexe.

Modèles d'apprentissage profond : l'avènement de l'apprentissage profond a considérablement influencé l' utilisation de ces modèles dans la classification du trafic chiffré. DF [19] utilise d'abord un réseau neuronal convolutif (CNN) pour extraire les fonctionnalités du trafic crypté, tandis que FS-NET [20] utilise un réseau neuronal récursif pour la classification du trafic crypté. DeepPacket [6] et TSCRNN [21] construisent des modèles en combinant l'extraction de fonctionnalités et la construction de classificateurs,

Machine Translated by Google

gérer automatiquement l'extraction et la classification des fonctionnalités lorsque la charge utile des paquets d'origine est entrée dans le modèle. Zhang et coll. [22] ont utilisé des réseaux de neurones graphiques pour extraire des fonctionnalités au niveau des paquets pour la classification du trafic. MT-FlowFormer [23] utilise un transformateur de flux semi-supervisé pour compléter la classification des flux cryptés. Lin et coll. [16] ont capturé des associations robustes et générales à partir de paquets de trafic bruts à l'aide de grands modèles pré-entraînés tels que la représentation d'encodeur bidirectionnel à partir de transformateurs (BERT), obtenant d'excellents résultats de classification. Néanmoins, les modèles d'apprentissage profond nécessitent généralement des architectures de réseau complexes et de vastes ensembles de données pour des performances optimales. Au contraire, notre modèle est conçu pour être efficace et nécessite moins de ressources.

2.2. Caractéristiques des signatures

de chemin Les signatures de chemin ont été initialement proposées par Chen [11] comme concept central de la théorie des chemins approximatifs, où « rugueux » fait référence à des chemins continus qui présentent de fortes fluctuations dans les chemins accidentés. Ces chemins sont continus mais ne peuvent pas être différenciés partout, et les séquences continues de taille de paquet dans le trafic chiffré peuvent être considérées comme des chemins approximatifs. Ces dernières années, les signatures de chemin ont regagné l'attention des chercheurs et ont été appliquées avec succès dans les domaines de l'apprentissage automatique, de la reconnaissance de formes et de l'analyse de données. Graham [24] a utilisé des fonctionnalités de signature de chemin basées sur une fenêtre coulissante avec un CNN pour la reconnaissance de caractères manuscrits, obtenant d'excellents résultats. LG Gyurkó [25] a utilisé des signatures de chemin pour extraire des caractéristiques des flux de données financières à des fins de classification des données financières. IP Arribas [26] a appliqué les signatures de chemin au domaine médical pour différencier les troubles mentaux. Dans [12], une nouvelle méthodologie a été introduite pour décrire les signatures à travers des signatures de chemin normalisées en longueur. L'étude a également exploré les caractéristiques de signature de chemin, en les employant conjointement avec l'algorithme Random Forest pour la classification du trafic crypté. Dans l'ensemble, ces applications démontrent l'efficacité de l'extraction de caractéristiques à l'aide de fonctions de signature de chemin et l' intérêt de représenter des vecteurs riches en informations. La section suivante présente la définition des signatures de chemin, leur interprétation géométrique d'ordre inférieur et les propriétés pertinentes. Pour plus de preuves mathématiques, reportez-vous à [11].

2.2.1. Définition des signatures de chemin

Une signature de chemin est une fonction de mappage transformateur qui convertit les données brutes de chemin en une séquence de nombres réels [12]. Chaque nombre de cette séquence est dérivé de manière unique à travers les points de données le long du chemin d'origine, capturant une caractéristique géométrique distincte de ce chemin. Pour un chemin X dans l'espace euclidien à d dimensions Rd défini comme une application continue de l'intervalle [a, b] à Rd, le paramètre t , [a, b] définit une trajectoire dans cet espace euclidien à d dimensions :

$$Xt = X \quad 1 \quad xxX\,{}^{d}{}_{t}{}^{2}{}_{t}{}^{3}{}_{t}{}_{,\,t\,,\,\ldots\,,\,t} \quad . \tag{1}$$

où X_t^d représente un chemin continu arbitraire dans la d-ième dimension. La signature du chemin, constituée de la signature d'ordre zéro (1) est une séquence infinie d'un chemin $X : [a, b] \to R^d$ et divers termes de signature d'ordre (également appelés intégrales itérées) :

$$S(X)a,b = (1,\ S(X)\quad {}^{1}_{un}\,B\ ,\ \ldots\ ,\ S(X)\ {}^{d}_{une,b}\ ,\ S(X)\ {}^{1,1}_{une,b}\ ,\ S(X)\ {}^{1,2}_{un}\,B\ ,\ \ldots\ ,\ S(X)\ {}^{ré,\,ré}_{un}\,B\ \ldots) \tag{2}$$

Pour un chemin X de dimension d , son intégrale itérée k fois peut être exprimée comme suit :

$$i1\ ,\ldots,ikS\ (X)\ =\ {}_{a}\ \ldots\ dXi1_{,\,i}\ \cdots\ dXik\ {}_{merci\,.} \tag{3}$$

$$a<tk<t \qquad a<t1<t2 \qquad t1$$

Dans la formule (3), t1, t2,. . ., tk font référence à des variables d'intégration distinctes de t. Cette distinction est faite pour éviter toute confusion avec le paramètre de chemin t lors d'intégrations multiples . En prenant le chemin bidimensionnel $Xt = X^{1,\,X^{2}}_{a}$ présenté sur la figure 1 comme exemple, ses caractéristiques de signature de chemin de troisième ordre sont les suivantes : {57,17, 54,67, 23,67, 30,33, 44,17, 34,33, 22,83, 20,83}.

Machine Translated by Google

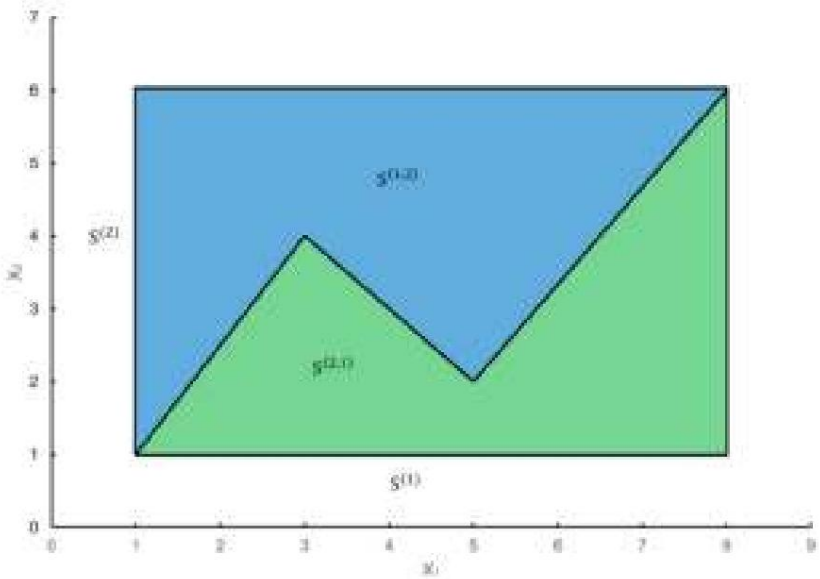


Figure 1. Interprétation géométrique du chemin bidimensionnel.

2.2.2. Interprétation géométrique des signatures de

chemin Pour expliquer davantage l'interprétation géométrique des caractéristiques de signature de chemin, nous utilisons un chemin bidimensionnel Xt = X comme exemple, où t [0,4], (a = 0,b = 4). Le chemin est défini par X = {X1, X2}. Il est important de noter que t est un paramètre continu ; par souci de commodité, nous avons ainsi quatre points discrets pour construire le chemin. La forme du chemin est illustrée à la figure 1. Les signatures calculées du chemin d'ordre zéro, de premier ordre et de deuxième ordre sont les suivantes :

$$S = 1, S(1), S(2), S(1,1), S(1,2), S(2,1), S(2,2) = \{1, 7, 5, 24.5, 19, 16, 12.5\}. \quad (4)$$

Dans le cadre de la signature de chemin, le premier élément, noté 1, est une constante, signifiant la caractéristique d'ordre zéro du chemin. S 1) et S (2) représentent les composantes de signature de chemin de () et () , correspondant aux distances de projection du chemin le long des axes X1 et X2 , respectivement. Les expressions S (1,2) et S (2,1) désignent les zones délimitées (,) et (,) par le chemin et les droites parallèles aux coordonnées, s'étendant par les points de départ et d'arrivée du chemin. Pendant ce temps, S (1,1) et S (2,2) reflètent la moitié des distances de projection carrées (,) et (,) du chemin sur les axes X1 et X2 , en conséquence. Nous expliquons uniquement les caractéristiques de signature de chemin d'ordre zéro, premier et deuxième, car les signatures de chemin d'ordre supérieur sont difficiles à décrire visuellement et notre méthode n'utilise que des signatures de second ordre. ffi

2.2.3. Propriétés des signatures de chemin

Dans cette section, nous développerons les propriétés cruciales des caractéristiques de signature de chemin. Ces propriétés constituent le fondement théorique et les avantages notables de leur application dans la classification du trafic crypté. Ils sont détaillés comme suit : • Unicité : Hambly et al. [27] ont établi que chaque chemin approximatif possède une signature de chemin ffi distincte , assurant une correspondance biunivoque entre les chemins non arborescents et leurs signatures. Cette propriété fondamentale affirme que les signatures de chemin peuvent encapsuler avec précision les traits géométriques des chemins. L'intégration du temps en tant que dimension croissante de façon monotone dans la séquence de trafic chiffré transforme ces séquences en chemins non arborescents, fournissant ainsi un cadre théorique robuste pour remplacer les chemins d'origine par leurs caractéristiques de signature de chemin comme entrée pour les modèles analytiques. • Invariance lors des changements de paramètres : différentes stratégies d'échantillonnage produisent des paramètres variés pour le même chemin, mais la signature du chemin reste cohérente à travers ces variations [27]. Cette invariance implique que les résultats de classification du trafic provenant de

Machine Translated by Google

les types d'applications spécifiques restent stables, non affectés par la diversité des paramètres. L'exploitation de cet attribut permet d'éliminer les écarts introduits par diverses reparamétrages du trafic au sein de la même catégorie, mettant en évidence l' avantage crucial de l'utilisation des fonctionnalités de signature de chemin.

• Invariance dimensionnelle : la dimensionnalité des caractéristiques de signature du chemin est déterminée uniquement par la profondeur de troncature choisie, indépendamment de la longueur réelle du chemin [27]. Par exemple, en considérant le chemin bidimensionnel discuté précédemment Xt = X 1 t [0,4], (a = 0,b = 4) avec X = {1, 3, 5, 8} et X = {1, 4, 2, 6}, la troncature à une dimension donne une longueur de signature de chemin de 3, X_t^1, X_t^2, tandis que la troncature à deux dimensions donne une longueur de 7. Cette extraction de caractéristiques de longueur fixe à partir de chemins de longueurs variables simplifie considérablement le processus d'extraction de caractéristiques. , en particulier pour les modèles nécessitant des fonctionnalités d'entrée de longueur fixe.

2.3. Modèle LSTM

Les réseaux LSTM, une sous-classe des réseaux de neurones récurrents (RNN), se distinguent par leur capacité à maintenir des dépendances à long terme [28]. Shen et coll. ont utilisé le LSTM pour analyser le coefficient de traînée des carrosseries de voitures [29]. Réf. [30] ont appliqué le LSTM pour prédire les niveaux des eaux souterraines, démontrant la capacité du modèle à gérer des données environnementales fluctuantes et à fournir des prévisions précises. Réf. [31] ont exploré les perspectives d'application du LSTM dans le domaine de la conduite autonome, soulignant son potentiel à traiter et à apprendre de grandes quantités de données séquentielles. Ces diverses applications soulignent la polyvalence du LSTM dans divers domaines et sa robuste capacité à gérer des données de séries chronologiques. Illustré dans la figure 2, les unités LSTM se distinguent des RNN traditionnels par l'intégration de trois « portes » distinctes, qui améliorent collectivement les capacités de gestion de la mémoire du modèle [32] : • Porte d'entrée : supervise le flux de données entrantes dans la cellule, décidant quelle quantité de nouvelles informations doit être stockée ;

• Porte de sortie : détermine dans quelle mesure l'état actuel de la cellule influence les autres parties du réseau, contrôlant le flux de sortie ;

• Forget Gate : ajuste les connexions auto-récurrentes de la cellule à l'aide de fonctions sigmoïdes pour mettre à l'échelle les valeurs entre 0 et 1, déterminant quelles informations sont rejetées ou conservées.

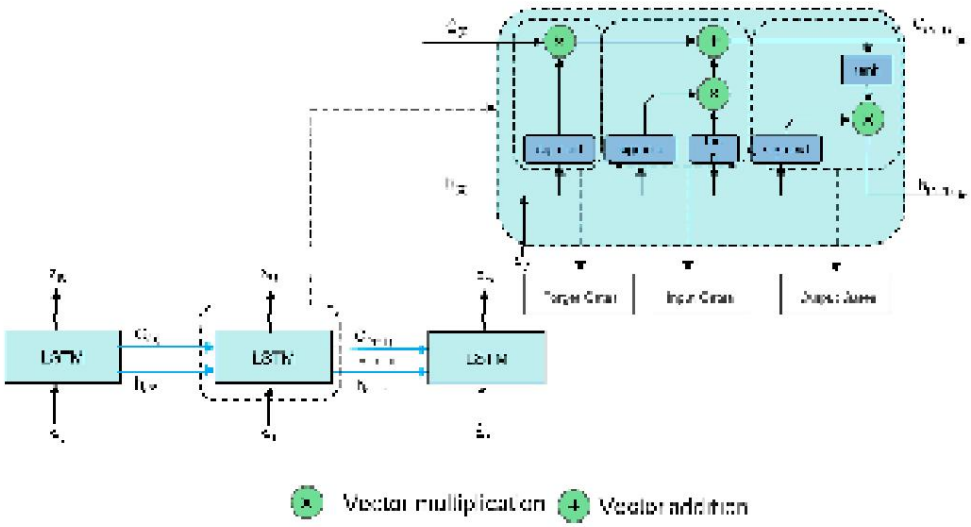


Figure 2. Architecture du modèle LSTM.

En tant que modèle de série chronologique typique, LSTM gère efficacement les caractéristiques de signature de chemin au sein des séquences. Connu pour sa capacité à capturer les dépendances à long terme dans les données séquentielles [29-31], LSTM est particulièrement bien adapté à cette tâche en raison de la nature séquentielle inhérente aux données de trafic réseau. Par rapport à d'autres modèles d'apprentissage profond bien connus tels que les CNN ou les Transformers, LSTM présente les avantages suivants dans cette tâche de classification du trafic crypté :

ffi

ffi

tt

Machine Translated by Google

• Meilleure gestion des dépendances temporelles : bien que les CNN excellent dans la capture des hiérarchies et des modèles spatiaux, ils sont généralement plus efficaces dans le traitement des données avec des corrélations spatiales (telles que les images) et ne peuvent pas capturer les dépendances temporelles aussi efficacement que le LSTM [33]. • Traitement des

données plus simple et plus direct : l'application de CNN pour séquencer des données nécessite de transformer la série temporelle dans un format adapté aux opérations de convolution, ce qui nécessite un traitement de données plus complexe. En revanche, LSTM permet la saisie directe des caractéristiques des séries chronologiques dans le modèle.

• Besoins en ressources informatiques réduits : les modèles de transformateur ont récemment gagné en popularité en raison de leur succès dans les tâches séquence à séquence, en particulier dans le traitement du langage naturel. Les transformateurs utilisent des mécanismes d'auto-attention pour capturer les dépendances entre différentes parties de la séquence d'entrée, quelle que soit leur distance [34]. Bien que cela soit bénéfique pour capturer les dépendances mondiales, les Transformers nécessitent généralement des ressources informatiques importantes et de grands ensembles de données pour la formation pratique. Les réseaux LSTM, utilisant des mécanismes de déclenchement inhérents pour traiter les données séquentielles, nécessitent moins de ressources informatiques pour la formation et le déploiement.

3. Méthodologie 3.1.

Aperçu de l'approche

Le flux de processus de notre méthode de classification du trafic chiffré est illustré dans la figure 3. Initialement, pendant la phase de prétraitement des données, nous disséquons les fichiers pcap des ensembles de données accessibles au public en employant les critères des cinq tuples, éliminant ensuite les paquets dépourvus de charges utiles valides. Cette étape garantit la création de flux de données de longueur uniforme.

En passant à la phase d'extraction des caractéristiques, nous dérivons les attributs de taille, de direction et d'heure d'arrivée de ces flux de données uniformes pour établir des chemins de trafic. Un processus de transformation est appliqué à ces chemins de circulation pour les enrichir d'informations supplémentaires. La prochaine étape consiste à exploiter des techniques d'accumulation à plusieurs échelles pour distiller les caractéristiques de signature des chemins à partir de ces chemins de circulation améliorés. Après avoir extrait ces fonctionnalités, nous appliquons des techniques d'équilibrage des données pour obtenir un ensemble de formation bien équilibré. Ces caractéristiques de signature de chemin optimisées sont entrées dans un modèle LSTM et des couches entièrement connectées pour exécuter la tâche de classification finale. Les prochaines sous-sections approfondiront chaque phase de cette méthodologie .

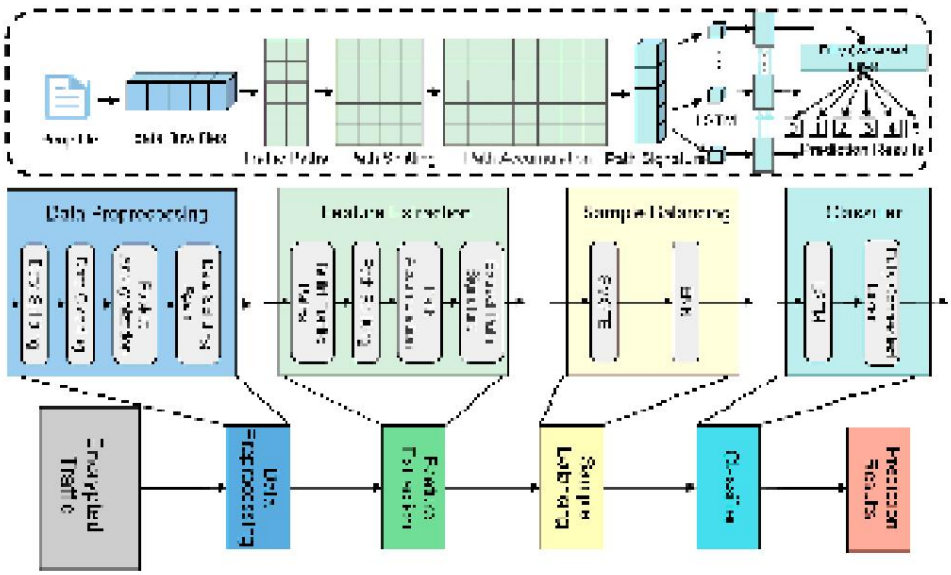


Figure 3. Le cadre général de notre approche.

Machine Translated by Google

3.2. Prétraitement des

données Lors du traitement des fichiers pcap bruts de l'ensemble de données, nous utilisons SplitCap pour les séparer en fichiers de session individuels, en utilisant les critères à cinq tuples : IP source, port source, IP de destination, port de destination et le protocole de couche de transport [3] . Les étapes suivantes consistent à éliminer les sessions dépourvues de données et de doublons. Pour atténuer le risque de surajustement du modèle avec cet ensemble de données, nous anonymisons les adresses MAC et IP dans les données par paquets en les remplaçant par des zéros [6]. Ensuite, nous affinons davantage les fichiers de session pour nous assurer que chacun contient précisément 24 paquets de données, un paramètre dont la signification sera développée dans la prochaine section expérimentale. Les sessions ne répondant pas au critère des 24 paquets de données sont exclues, générant des exemples de fichiers qui correspondent à nos prérequis expérimentaux.

3.3. Créer des chemins

de trafic Après avoir standardisé les fichiers de session sur une longueur uniforme, nous catégorisons les paquets de données transmis du client au serveur avec des valeurs positives tout en étiquetant les paquets se déplaçant dans le sens inverse avec des valeurs négatives. Ce processus aboutit à la création d'une séquence de longueur de paquet de données, L = (l1, l2, . . . , ln), où l représente la longueur de chaque paquet de données [26]. De plus, nous capturons l'heure d'arrivée de chaque paquet de données. Pour synchroniser ces horodatages, nous normalisons les données pour compiler une séquence temporelle pour les paquets, notée T = (t1, t2, . . . , tn), où t représente l'heure d'arrivée de chaque paquet de données.

3.4. Transformer les chemins

de trafic Suite à l'extraction des caractéristiques de signature de chemin bidimensionnelles, qui encapsulent la durée et la longueur des paquets de données, nous reconnaissons que la représentation des informations inter-sessions reste incomplète. Pour améliorer l'utilisation des caractéristiques inter-sessions, nous adoptons une méthodologie inspirée des travaux de Xu et al. [12]. Cette approche consiste à transformer les voies de circulation d'origine pour dévoiler des couches d'informations supplémentaires, facilitant ainsi une analyse plus détaillée et informative.

3.4.1. Division de chemin

Dans notre méthode, le terme « client » fait référence aux utilisateurs qui ont besoin de services Internet. C'est l' utilisation par les clients de divers services sur Internet qui génère différents types de trafic crypté. Par exemple, lorsqu'un utilisateur télécharge ou télécharge des fichiers en ligne, un trafic de transfert de fichiers est généré. De même, lorsqu'un utilisateur utilise des services de streaming, comme écouter de la musique ou regarder des vidéos, du trafic de streaming est généré. Pour décrire plus précisément la dynamique du flux de trafic entre le client et le serveur, nous divisons la séquence de longueur des paquets de données en deux séquences distinctes. Une séquence capture les transmissions de données du client au serveur, tandis que l'autre détaille les transmissions du serveur au client [12]. Cette division est formalisée comme suit ci-dessous.

Pour les transmissions client-serveur :

$$C = (c1, c2, \ldots, cn),\ ci = \begin{matrix} 0,\ li < 0\ li\ , \\ li > 0.. \end{matrix} \quad (5)$$

A l'inverse, pour les transmissions serveur vers client :

$$S = (s1,s2, \ldots ,sn),si = \begin{matrix} li\ ,\ li < 0\ 0, \\ li > 0.. \end{matrix} \quad (6)$$

En attribuant la valeur zéro à la taille des paquets de données provenant de la direction de transmission opposée, nous soulignons les propriétés de flux distinctes inhérentes à chaque direction, établissant ainsi un cadre fondamental pour d'autres transformations de chemin.

3.4.2. Accumulation de chemin

Les fonctionnalités d'accumulation jouent un rôle crucial dans la classification du trafic chiffré [35], principalement parce que la taille de la charge utile a tendance à rester constante pour le même type de trafic.

Machine Translated by Google

service, conduisant à des schémas d'accumulation similaires. Pour tirer parti de cette cohérence pour révéler informations dans les charges utiles de trafic cryptées, nous définissons les fonctionnalités d'accumulation comme suit ci-dessous.

Accumulation directe de longueurs de paquets :

$$L' = je\ {}'_{1,2,\cdots,}\ {}'_{n,}\ {}'_{} = \sum_{je=1}^{K} li\ , \tag{7}$$

Pour les transmissions dirigées par le client :

$$C' = c\ {}'_{1,2,dans,}\cdots, c'\ \ c' = \sum_{je=1}^{K} ci\ , \tag{8}$$

Pour les transmissions dirigées vers le serveur :

$$S' = s\ {}'_{1,s2,}\cdots, s'_{n}\ ,s'_{} = \sum_{je=1}^{k} si\ . \tag{9}$$

Nous obtenons ainsi une représentation complète du chemin de circulation à travers ce qui suit:

$$Xl_{t}c,s,l',c',s',t\ = L, C, S, L\ \ ', C', S', T\ \ , t\ \ [0, n]. \tag{dix}$$

Cette représentation intègre les séquences initiales de longueur des paquets de données et leurs versions accumulées aux côtés de la séquence d'heure d'arrivée, offrant une vue à multiples facettes de l'environnement. flux de circulation pour une classification adéquate. Prendre un chemin de circulation spécifique L = [194,−83,−32,53,86] et T = [0,2,5,8,10] à titre d'exemple, le chemin de trafic transformé correspondant est représenté dans Tableau 1.

Tableau 1. Exemples de sept voies de circulation différentes.

$X_5^{l,c,s,l',c,s',t}$						
L	C	S	L'	C'	S'	T
194	194	0	194	194	0	0
−83	0	−83	111	194	−83	2
−32	0	−32	79	194	−115	5
53	53	0	132	247	−115	8
86	86	0	218	333	−115	dix

3.5. Extraction de la signature du chemin

Lors de la transformation des voies de circulation, notre prochaine étape consiste à extraire la signalisation des voies. caractéristiques naturelles. Nous définissons la caractéristique de chemin f pour chaque chemin transformé comme suit :

$$pi = \varphi(X\ {}^{l,c,s,l',c',s',t}_{t}), t\ \ [0, n]. \tag{11}$$

Ici, φ(X) désigne la fonction responsable de l'extraction de la signature du chemin et ft représente la signature de chemin des t premiers paquets de données. Il est important de noter que la dimensionnalité des caractéristiques de signature du chemin dépend uniquement du chemin choisi profondeur de troncature, indépendante de la longueur réelle de chaque chemin. Dans un plusieurs à un Dans le modèle LSTM, il est d'usage d'utiliser les caractéristiques du dernier pas de temps comme entrée pour le calcul final. classification.

Tirant parti des propriétés uniques de la signature de chemin et du modèle LSTM, comme illustré à la figure 4, nous introduisons une nouvelle extraction de caractéristiques d'accumulation multi-échelles approche. Cette méthode améliore la valeur informationnelle extraite au pas de temps final entrée dans le modèle. La formulation et la structure de la séquence de fonctionnalités d'entrée sont détaillées comme suit:

$$F = (f2, f3, \ldots, fn). \tag{12}$$

Machine Translated by Google

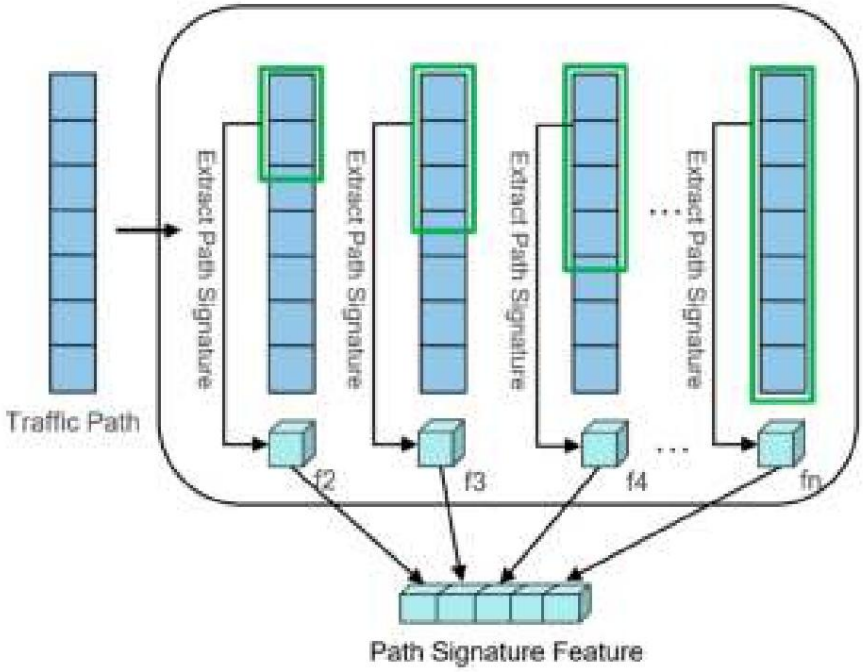


Figure 4. Méthode d'extraction des caractéristiques d'accumulation à plusieurs échelles.

L'exigence selon laquelle n ≥ 2 découle du fait qu'une signature de chemin basée sur moins de deux paquets de données manque de pertinence substantielle. Lorsque n = 1, la signature du chemin se réduit à simplement refléter la longueur et l'heure d'arrivée d'un seul paquet de données, ne satisfaisant pas les critères de notre configuration expérimentale. Par conséquent, nous compilons la séquence de signatures de chemin F, où chaque élément contient les caractéristiques de signature de chemin des n premiers paquets de données, et toutes les signatures de chemin ont la même dimension.

3.6. Équilibrage des données

Rencontrer des données déséquilibrées entre différentes classifications est un problème courant lors de la collecte de données expérimentales à partir d'ensembles de données. La mise en œuvre de techniques d'équilibrage des données est essentielle pour renforcer l'efficacité des tâches de formation. Cette section décrit les stratégies que nous avons adoptées pour atteindre l'équilibre des données.

3.6.1. SMOTE (technique de suréchantillonnage minoritaire synthétique)

Introduit par Chawla [36], SMOTE est une méthodologie de suréchantillonnage de premier plan pour corriger les problèmes de déséquilibre des données. Il augmente l'ensemble de données en créant de nouvelles instances synthétiques pour la classe minoritaire dérivées d'observations existantes. Dans l'espace des fonctionnalités, SMOTE crée des échantillons synthétiques ressemblant à la classe minoritaire. Plus précisément, pour chaque échantillon de classe minoritaire , SMOTE identifie ses n voisins les plus proches en utilisant la distance euclidienne. Suite à cela, un voisin est choisi aléatoirement, générant un vecteur reliant ce voisin et l' échantillon. Une instance synthétique est ensuite formée en ajoutant une fraction aléatoire de ce vecteur à l'échantillon d'origine. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le taux de suréchantillonnage cible soit atteint [36]. La formule de l'algorithme SMOTE est donnée comme suit :

$$R_n = s + rand(0,1) \times |s - s_R|, \quad 0 \le d \le 1. \tag{13}$$

où s symbolise les échantillons de classe minoritaire, s_R désigne les voisins déterminés par k voisins les plus proches, d est une valeur sélectionnée au hasard dans la plage [0,1] et n représente l' échantillon synthétique généré. Comme le montre la figure 5, deux points de couleurs différentes représentent deux types d'échantillons différents, les trois voisins les plus proches de l'échantillon s sont s1 R, s2 R et s3 R. À l'aide de la méthode SMOTE, un voisin $s1_R$ est sélectionné au hasard pour l'échantillon s et un nouvel échantillon n est obtenu par calcul.

Machine Translated by Google

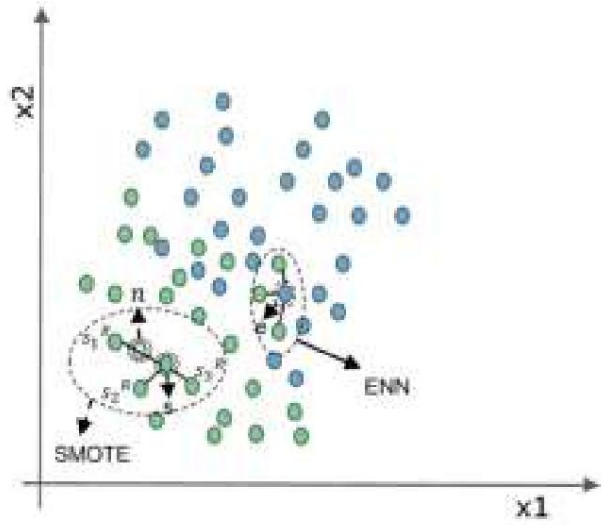


Figure 5. L'exemple de SMOTE et ENN.

3.6.2. ENN (Voisins les plus proches modifiés)

ENN utilise l'algorithme des k voisins les plus proches comme stratégie d'échantillonnage secondaire [37]. Il vise à élaguer l'ensemble de données en supprimant les instances susceptibles d'être mal classées. ENN calcule la distance euclidienne pour chaque instance afin d'identifier ses k voisins les plus proches (où k est généralement défini sur 3). Si la plupart de ces voisins ne partagent pas la classe de l'instance, l'instance et ses voisins sont excisés de l'ensemble de données [37]. Ainsi, ENN peut réduire efficacement la présence d'échantillons de classe majoritaires dans l'ensemble de formation. En prenant l'échantillon e de la figure 5 comme exemple, ses k voisins (fixés à 3) appartiennent tous à d'autres classes. En utilisant la méthode ENN, les quatre échantillons seront supprimés.

3.6.3. SMOTE-ENN

SMOTE-ENN combine les atouts de SMOTE et d'ENN dans une approche unifiée de l'équilibrage des données, comme proposé par Batista et al. [38]. Dans un premier temps, l'ensemble de données subit une amélioration via l'algorithme SMOTE, qui amplifie la représentation de la classe minoritaire grâce à la création d'échantillons synthétiques. Une fois qu'un nombre adéquat d'échantillons de classes minoritaires est produit, l'algorithme ENN est appliqué pour affiner davantage l'ensemble de données en supprimant les instances proches de la limite de classification. Cette application séquentielle de SMOTE et ENN facilite un ensemble d'échantillons plus uniformément répartis entre les classes [38].

3.7. Entrée dans le modèle LSTM

La séquence de signatures de chemin, notée F, sert d'entrée au modèle LSTM, ouvrant la voie au processus de classification. La configuration des pas de temps au sein du LSTM est directement corrélée à la longueur du chemin de trafic initial, réduite de un.

Par conséquent, la caractéristique fn+1 au nième pas de temps encapsule la signature de chemin d'un chemin de trafic comprenant n + 1 paquets de données. Cette disposition garantit qu'à chaque pas de temps supplémentaire, davantage d'informations sont incorporées, enrichissant ainsi la représentation des données. Notamment, la fonctionnalité au pas de temps final intègre la signature de l'ensemble du trajet de trafic, incarnant les informations les plus exhaustives disponibles.

La capacité de mémoire inhérente au modèle LSTM [28] joue un rôle central, permettant à chaque pas de temps d'exploiter et de transmettre les informations des étapes précédentes. En conséquence, le pas de temps final regroupe efficacement les informations sur l'ensemble de la séquence, évitant ainsi les inconvénients potentiels de s'appuyer uniquement sur des caractéristiques globales. Cette intégration complète des informations augmente considérablement la précision de classification du modèle.

Machine Translated by Google

3.8. Couche entièrement connectée

Suite au traitement par le LSTM de la séquence d'entrée, la sortie du dernier pas de temps subit une extraction et est ensuite dirigé vers une couche entièrement connectée, où le L'effort de classification est actualisé. L'essence de cette couche réside dans sa capacité à faire la transition les caractéristiques des données acquises par le LSTM dans le domaine de l'espace des étiquettes. L'opération au sein du la couche entièrement connectée est mathématiquement représentée comme suit :

$$Y = W \times X + B. \tag{14}$$

où Y est le vecteur de sortie, W est le poids de la couche entièrement connectée, X est l'entrée vecteur dérivé du pas de temps final du LSTM, et B est le biais.

3.9. Flux de travail complet

Dans cette section, nous expliquerons en détail le flux de travail de notre méthode proposée. Après capturant un segment de trafic, nous extrayons d'abord les deux caractéristiques statistiques de base de la longueur des paquets et l'heure d'arrivée des paquets pour former le chemin de trafic. Nous divisons ensuite la séquence de longueur de paquet en deux chemins représentant la direction de transmission des paquets. Ensuite, nous effectuons une processus d'accumulation pour obtenir trois chemins représentant la longueur cumulée du paquet transmission. Il en résulte un chemin de circulation à sept dimensions.

En employant la fonction de caractéristique de signature de chemin, nous transformons le plan à sept dimensions chemin de trafic en caractéristiques de signature de chemin de grande dimension, qui sont ensuite introduites dans le LSTM modèle. Le modèle LSTM traite la séquence d'entrée progressivement, étape par étape. À chaque pas de temps, les caractéristiques d'entrée interagissent avec l'état caché et l'état de la cellule mémoire à partir du pas de temps précédent. Grâce à une série de mécanismes de contrôle, l'état caché et la mémoire L'état des cellules est mis à jour à chaque pas de temps, permettant au modèle de capturer efficacement le temps dépendances au sein des données de trafic.

Après avoir traité toute la séquence, l'état caché du modèle LSTM au final le pas de temps est sélectionné comme sortie de fonctionnalité. Cet état caché a intégré des informations de la séquence d'entrée entière et représente les caractéristiques globales des données de séquence. L'état caché sélectionné est ensuite entré dans une couche entièrement connectée. Le entièrement connecté couche, grâce à une série de poids et de fonctions d'activation, traite davantage le caché état pour générer une distribution de probabilité pour le résultat de la classification. Le tableau 2 illustre les changements de forme à chaque étape du traitement d'une séquence de trafic cryptée contenant 24 paquets.

Tableau 2. La forme des données change à chaque étape du traitement.

Scène	Description	Forme
Données brutes	Capturez la séquence de trafic cryptée	—
Construire des chemins de circulation	Extraire la longueur du paquet et l'heure d'arrivée	(24, 2)
Fractionnement du chemin	Divisez la séquence de longueur en deux chemins	(24, 4)
Accumulation de chemin	Accumulez des séquences de trois longueurs	(24, 7)
Chemin d'extraction	Utilisez la fonction de fonctionnalité de signature de chemin pour extraire	(24, 56)
Signature	caractéristiques de signature de chemin	
Entrée LSTM	Utiliser les fonctionnalités de signature de chemin comme entrée dans	(1, 24, 56)
Unités cachées LSTM	les unités cachées LSTM 64 de l'entrée de processus de couche LSTM	(1, 24, 64)
	séquence, renvoyant les états cachés pour tous les pas de temps	
État caché final	Sélectionnez l'état caché du dernier pas de temps dans le modèle LSTM et saisissez le modèle complet couche connectée	(1, 64)
Sortie de couche entièrement connectée	La couche entièrement connectée produit le distribution de probabilité du résultat du classement	(1, 6)

Machine Translated by Google

4. Discussion

Dans cette section, nous développerons divers aspects de notre cadre expérimental, mettant en lumière diverses facettes telles que l'environnement expérimental, les métriques d'évaluation, les ensembles de données utilisés, les techniques de traitement des données et la sélection d'hyperparamètres. De plus, pour établir l'efficacité et l'avantage concurrentiel de notre méthodologie, nous avons mené des expériences comparatives avec les techniques traditionnelles dominantes. Des études d'ablation ont également été entreprises pour souligner la contribution et l'impact des composants individuels dans le cadre proposé.

4.1. Environnement expérimental

Les expériences ont été menées sur un système d'exploitation Windows 10 avec Python version 3.9. Nous avons implémenté le modèle LSTM à l'aide de PyTorch version 1.13.1. Nous avons fixé le taux d'apprentissage initial pour la formation du modèle à 0,0001 et les époques de formation à 500. Le modèle LSTM utilisé pour cette expérience comporte 64 dimensions cachées et la dimension de sortie de la couche entièrement connectée suivante est de 6, ce qui correspond à la classification en six classes. tâche des types de services de trafic cryptés.

4.2. Paramètres d'évaluation

Nous avons utilisé quatre paramètres d'évaluation pour évaluer les performances de la méthode : l'exactitude (AC), la précision (PR), le rappel (RC) et le score F1 (F1). Les vrais positifs (TP) sont des échantillons positifs correctement identifiés, les faux positifs (FP) sont des échantillons négatifs classés à tort comme positifs, les vrais négatifs (TN) sont des échantillons négatifs correctement identifiés et les faux négatifs (FN) sont des échantillons positifs classés à tort comme négatifs.

$$\text{Précision} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}}, \tag{15}$$

$$\text{Précision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP},} \tag{16}$$

$$\text{Rappel} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \tag{17}$$

$$\text{Score F1} = \frac{2 \quad \text{Précision} \quad \text{Rappel}}{\text{Précision} + \text{Rappel}}. \tag{18}$$

Ces mesures offrent une vue complète de l'efficacité du modèle, encapsulant ses l'exactitude, la précision et la sensibilité dans la classification des données dans leurs catégories respectives.

4.3. Ensembles de données

Pour vérifier de manière exhaustive les performances de notre méthode proposée, nous avons utilisé deux ensembles de données accessibles au public : l'ensemble de données ISCX VPN-nonVPN [39] et l' ensemble de données ISCX Tor-nonTor [40]. Ces ensembles de données ont été publiés par l'Université du Nouveau-Brunswick.

L'ensemble de données ISCX VPN-nonVPN se compose de deux parties : ISCX-VPN et ISCX-nonVPN. L'ensemble de données ISCX-VPN contient le trafic capturé dans un environnement VPN pour six types de services : chat, courrier électronique, transfert de fichiers, streaming, P2P et VoIP. L'ensemble de données ISCX-nonVPN inclut les mêmes types de trafic, mais capturés en dehors de l'environnement VPN.

De même, l'ensemble de données ISCX Tor-nonTor est divisé en ISCX-Tor et ISCX-nonTor. L' ensemble de données ISCX-Tor collecte le trafic via le réseau Tor, ce qui offre un haut niveau d' anonymat. L'ensemble de données ISCX-nonTor contient du trafic collecté en dehors de l'environnement Tor, avec des types de trafic identiques à ceux de l'ensemble de données ISCX-VPN. Le tableau 3 présente les principales applications correspondant à chaque type de service et fournit une brève description.

Machine Translated by Google

Tableau 3. Détails de l'ensemble de données.

Service	Application	Description
Chat	AIM, ICQ, Skype, Facebook, Hangouts	Trafic généré lors du chat en ligne communication
E-mail	E-mail, Gmail	Trafic généré lors de l'e-mail transmission
Transfert de fichier	Skype SFTP, FTPS, SCP	Trafic généré lors des téléchargements de fichiers et téléchargements
Streaming	Viméo, YouTube, Netflix, Spotify	Trafic généré lors de l'utilisation applications de diffusion en continu
P2P	uTorrent, BitTorrent	Trafic généré lors du partage de torrent ressources utilisant des programmes P2P
VoIP	Facebook, Skype, Hangouts, VoipBuster	Trafic généré lors des appels vocaux en ligne

Après avoir obtenu l'ensemble de données, nous avons utilisé la longueur du paquet et l'heure d'arrivée pour construire nos caractéristiques de signature de chemin. La longueur des paquets fait référence à la taille en octets de chaque paquet dans le flux de données. Puisque la transmission du trafic dans un réseau est généralement bidirectionnelle, nous avons ajouté panneaux positifs et négatifs pour indiquer le sens de la circulation : circulation du client vers le serveur a été défini comme positif et le trafic du serveur vers le client a été défini comme négatif. Cela a créé une séquence de longueur de paquet qui représente à la fois le sens de transmission et taille de chargement des paquets.

L'heure d'arrivée des paquets fait référence à l'heure à laquelle chaque paquet est reçu, à partir du la réception du premier paquet et enregistrer l'heure d'arrivée de chaque paquet suivant. Il en résulte une série temporelle croissante qui représente la fréquence de transmission du paquets. En segmentant et en accumulant la séquence de longueur de paquet et en normalisant les heures d'arrivée des paquets, nous avons obtenu le chemin de trafic final. Ce chemin a ensuite été saisi dans la fonction de fonctionnalité de signature de chemin pour dériver les fonctionnalités de signature de chemin de trafic requises pour notre méthode.

4.4. Équilibrage des données

En traitant du déséquilibre d'échantillon inhérent à l'ensemble de données ISCX VPN-nonVPN pour la classification du trafic crypté, notre méthodologie a employé une approche multiforme pour garantir une représentation équitable entre les différents types de services de trafic. Initialement, un seuil de 5 000 échantillons a été établi, les catégories dépassant ce nombre étant réparties aléatoirement. sous-ensemble de 5 000 échantillons choisis, alors que les catégories inférieures à ce seuil ont été utilisées tous les échantillons disponibles pour maximiser l'utilisation des données. Après cette sélection, la catégorie avec le Le nombre d'échantillons le plus bas a été identifié, établissant ainsi une référence en matière d'uniformité. Une portion correspondant à un cinquième de ce décompte minimal a été extrait de chaque catégorie pour assembler un ensemble de tests complet, garantissant une représentation équilibrée. Le SMOTE-ENN a été appliqué pour remédier au déséquilibre résiduel dans l'ensemble de données de formation, synthétisant de nouveaux échantillons pour les classes minoritaires et suppression des échantillons ambigus pour affiner la qualité de l'ensemble de données. La figure 6 compare le nombre d'échantillons pour chaque catégorie avant et après équilibrage pour les données de l'ensemble de formation dans l'ensemble de données ISCX-VPN.

Machine Translated by Google

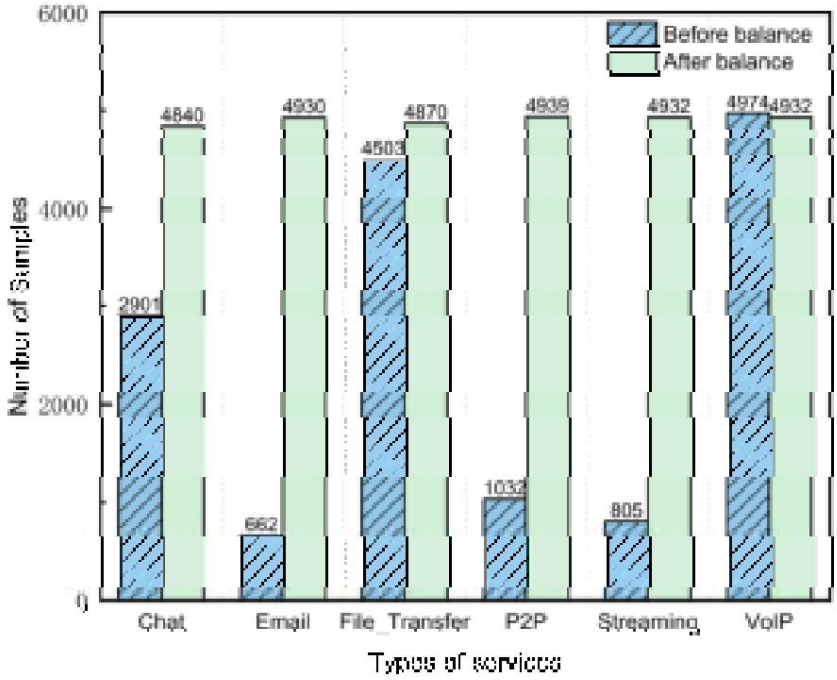


Figure 6. Le nombre d'échantillons.

4.5. Sélection des paramètres

Dans nos expériences, les valeurs de deux hyperparamètres cruciaux, à savoir la longueur des chemins de circulation et les dimensions des signatures de chemin, ont joué un rôle important et étaient étroitement liées aux performances du modèle. Ils ont directement façonné la capacité du modèle à apprendre et à interpréter les données, influençant ainsi la profondeur et l'étendue de l'analyse.

La longueur du chemin de trafic détermine les données d'entrée pour chaque instance d'analyse, ce qui a un impact sur la compréhension du modèle de la continuité de session. Pendant ce temps, la dimensionnalité des signatures de chemin affecte la complexité et le détail des caractéristiques extraites des chemins de trafic, équilibrant entre la richesse des informations et la faisabilité informatique. Dans cette section, nous développons le processus d'obtention de ces hyperparamètres.

La longueur optimale du chemin de trafic est dictée par la nécessité d'inclure un nombre suffisant de paquets de données consécutifs avec des charges utiles valides dans un fichier de session, qui constitue la base du chemin de trafic d'origine. Une longueur de chemin trop succincte peut conduire à des fichiers de session dépourvus de données adéquates pour des tâches efficaces de classification du trafic. À l'inverse, des trajets de circulation trop allongés peuvent inutilement augmenter les exigences en matière de collecte de données sans gains proportionnels en termes de précision de classification [41]. La détermination de la longueur optimale des voies de circulation était essentielle en tant qu'élément fondamental de notre conception expérimentale.

En classant les types de services pour le trafic crypté dans des conditions VPN, nous avons cherché à déterminer la longueur de chemin optimale. Comme le montre la figure 7, lorsque la longueur du trajet était relativement courte, la précision de la classification fluctuait et s'améliorait progressivement avec l' augmentation de la longueur du trajet pour une dimension donnée. Lorsque la longueur du trajet atteignait 20, les modèles multidimensionnels obtenaient des performances de classification relativement bonnes. Parmi ceux-ci, le modèle de trajet bidimensionnel a atteint la précision de classification la plus élevée (94,74 %) lorsque la longueur du trajet était de 24. Par la suite, à mesure que la longueur du trajet augmentait, la précision de la classification ne s'est pas améliorée de manière significative et, dans certaines dimensions, a même diminué. Par conséquent, nous avons sélectionné 24 comme paramètre optimal pour la longueur du trajet.

De plus, le choix des dimensions de la signature du chemin est tout aussi critique. Les signatures de chemin d'ordre supérieur encapsulent intrinsèquement plus d'informations que leurs homologues d'ordre inférieur. Néanmoins, une augmentation des dimensions des signatures de chemin précipite une augmentation exponentielle des dimensions des caractéristiques [11]. Par exemple, une caractéristique de signature de deuxième ordre dans un chemin de trafic à sept dimensions aurait une dimensionnalité de 56, passant à 399 pour le troisième ordre et à 2 800 pour le quatrième ordre. Cette tendance souligne l'équilibre requis

Machine Translated by Google

entre le gain d'information provenant de l'augmentation des dimensions de signature de chemin et le résultat complexité informatique.

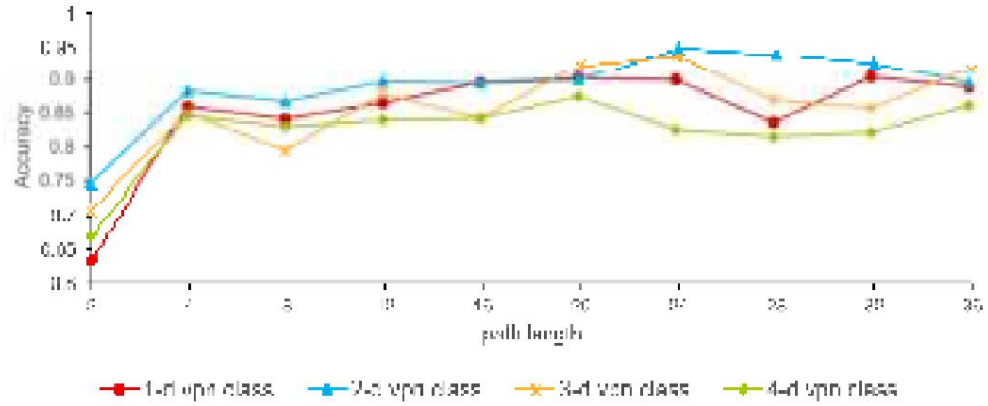


Figure 7. Effet de la longueur et de la dimension du paquet (précision).

Comme le montre la figure 7, sur la base de nos expériences, l'augmentation des dimensions n'a pas eu d'effet. améliorer considérablement les performances de classification. Il y a eu une légère diminution des performances lorsque les dimensions ont été augmentées à quatre. Nous avons opté pour un cheminement en deux dimensions la signature comme paramètre optimal compte tenu des performances de classification et de l'efficacité du calcul.

4.6. Analyse de sensibilité

Pour évaluer la robustesse de notre méthode, nous avons effectué une analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité est une technique utilisée pour évaluer la réactivité d'un modèle aux changements de paramètres. Nous avons observé l'impact sur les performances du modèle en faisant varier le taux d'apprentissage et les paramètres de régularisation pendant la formation du modèle. Expressément, tout en évaluant l'impact du taux d'apprentissage, nous fixons le paramètre de régularisation L2 à 0,0001, et tout en évaluant le impact du paramètre de régularisation, nous fixons le taux d'apprentissage à 0,0001. L'expérimental les résultats sont présentés dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4. Précision de la classification selon différents taux d'apprentissage.

Taux d'apprentissage	0,1	0,01	0,001	0,0001	0,00001
Précision	0,8596	0,8918	0,9152	0,9474	0,9298

Tableau 5. Précision de la classification sous différents paramètres de régularisation.

Paramètres de régularisation	0,01	0,001	0,0001	0,00005	0,00001
Précision	0,8099	0,9006	0,9474	0,921	0,9152

On peut observer qu'à mesure que le taux d'apprentissage et les paramètres de régularisation changent, la précision de la classification de notre méthode proposée est restée constamment élevée, malgré certains fluctuations. Cela indique la forte robustesse de notre méthode. La capacité de maintenir un un haut niveau de précision dans diverses conditions démontre la fiabilité et la stabilité de notre approche.

4.7. Étude sur l'ablation

Souligner les contributions de chaque composante dans notre méthode proposée pour classification du trafic crypté, nous avons exécuté une série d'études d'ablation. Ces études ont été conçu pour évaluer individuellement l'impact de la caractéristique de signature du chemin, le test multi-échelle méthode d'extraction de fonctionnalités cumulatives et le modèle LSTM sur les performances globales.

Machine Translated by Google

Ablation des caractéristiques de signature de chemin : Pour cette partie de l'étude, nous n'extrayons plus les caractéristiques de signature de chemin des chemins de circulation. Au lieu de cela, les échantillons bruts de caractéristiques à sept dimensions ont été introduits directement dans le modèle LSTM, en contournant l' étape de traitement de la signature du chemin. Toutes les autres conditions expérimentales ont été maintenues en utilisant la méthode établ

Ablation par méthode d'extraction de caractéristiques : en évaluant le rôle de notre méthode d'extraction de caractéristiques cumulatives multi-échelles, nous avons mis de côté cette approche avancée au profit de la méthode classique référencée par Xu et al. [12]. Les caractéristiques obtenues grâce à ce processus d'extraction traditionnel ont ensuite été introduites dans le modèle LSTM pour classification. Encore une fois, cet ajustement a été effectué tout en gardant inchangés tous les autres paramètres expérimentaux.

Ablation du modèle LSTM : Pour examiner la contribution spécifique du modèle LSTM, nous l' avons remplacé par un algorithme Random Forest pour la tâche de classification, en utilisant des paramètres alignés sur ceux suggérés par Xu [12]. Cette substitution nous a permis de comparer directement l'efficacité du LSTM avec une technique de classification alternative bien établie.

Les résultats de ces expériences d'ablation, comme le montre la figure 8, présentent des variations significatives lorsqu'ils sont juxtaposés aux résultats obtenus en utilisant l'ensemble de notre méthode. De telles différences mettent en évidence le rôle essentiel de chaque composant dans notre méthodologie, validant leur nécessité collective et leur efficacité dans l'amélioration de l'exactitude de la classification.

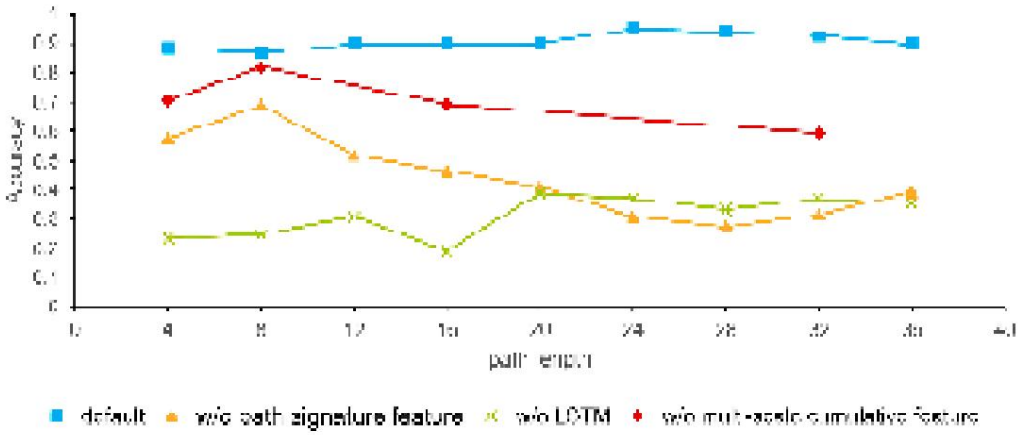


Figure 8. Résultats des études d'ablation.

Grâce à ces études d'ablation, la valeur intégrale et l'effet synergique des caractéristiques de signature de chemin, de la nouvelle méthode d'extraction de caractéristiques et du modèle LSTM ont été démontrés , affirmant leurs contributions indispensables aux performances supérieures de notre méthode.

4.8. Expériences de comparaison

4.8.1. Les méthodes de référence

Pour vérifier l'efficacité de notre méthode proposée de classification du trafic crypté, elle a été comparée à 11 approches traditionnelles contemporaines. Ces méthodologies couvrent les domaines suivants : 1. Construction d'empreintes digitales : FlowPrint [17] ; 2. Méthodes statistiques : AppScanner [9], CUMUL [35], K-FP (K-Fingerprinting) [42], GRAIN [43] et ETC-PS [12] ; 3. Modèles d'apprentissage profond : FS-net [20], DF [19], MT-FlowFormer [23], GraphDApp [44] et ET-BERT (flow) [16].

Notamment, notre méthode proposée utilise exclusivement les fonctionnalités de niveau flux du trafic chiffré. Par souci d'équité, nous avons choisi de le comparer à ET-BERT (flux), qui repose également uniquement sur des fonctionnalités au niveau du flux, plutôt qu'à ET-BERT (paquet), qui atteint de meilleures performances de classification mais nécessite des fonctionnalités au niveau des paquets.

Machine Translated by Google

4.8.2. Résultats expérimentaux

Nous avons évalué l'efficacité de diverses méthodes, dont la nôtre, sur l'ISCX Ensembles de données VPN-nonVPN et ISCX Tor-nonTor, comme indiqué dans les tableaux 6 et 7. Le tableau 6 présente les performances de classification des types de services de trafic dans les environnements VPN et non-VPN, tandis que le tableau 7 montre les performances de classification dans les environnements Tor et non-Tor. Notre méthode a démontré une performance supérieure et compétitive sur la plupart des indicateurs par rapport à la plupart des méthodes de référence.

Tableau 6. Performances de classification des différentes méthodes pour l'ensemble de données ISCX VPN-nonVPN.

Base de données	ISCX-VPN				ISCX-non VPN			
Méthode	Précision	Précision	Rappel	Score F1	Précision	Précision	Rappel	Score F1
FlowPrint [17]	0,8538	0,7451	0,7917	0,7566	0,6944	0,7073	0,7310	0,7131
Scanner d'applications [9]	0,8889	0,8679	0,8851	0,8722	0,7576	0,7594	0,7465	0,7486
CUMUL [35]	0,7661	0,7531	0,7852	0,7644	0,6187	0,5941	0,5971	0,5897
K-FP [42]	0,8713	0,8750	0,8748	0,8747	0,7551	0,7478	0,7354	0,7387
GRAINES [44]	0,8129	0,8077	0,8109	0,8027	0,6667	0,6532	0,6664	0,6567
ETC-PS [12]	0,8889	0,8803	0,8937	0,8851	0,7273	0,7414	0,7133	0,7208
FS-net [20]	0,9298	0,9263	0,9211	0,9234	0,7626	0,7685	0,7534	0,7355
DF [19]	0,8012	0,7799	0,8152	0,7921	0,6742	0,6857	0,6717	0,6701
MT-FlowFormer [23]	0,9327	0,9152	0,9243	0,9193	0,8549	0,8473	0,8268	0,8344
GraphDApp [44]	0,6491	0,5668	0,6103	0,5740	0,4495	0,4230	0,3647	0,3614
ET-BERT (flux) [16]	0,9532	0,9436	0,9507	0,9463	0,9167	0,9245	0,9229	0,9235
Proposé	0,9474	0,9480	0,9474	0,9472	0,9053	0,9064	0,9053	0,9050

Tableau 7. Performances de classification des différentes méthodes pour l'ensemble de données ISCX Tor-nonTor.

Base de données	ISCX-Tor				ISCX-nonTor			
Méthode	Précision	Précision	Rappel	Score F1	Précision	Précision	Rappel	Score F1
FlowPrint [17]	0,2400	0,0300	0,1250	0,0484	0,5243	0,7590	0,6074	0,6153
Scanner d'applications [9]	0,7543	0,6629	0,6042	0,6163	0,9153	0,8435	0,814	0,8273
CUMUL [35]	0,6686	0,5349	0,4899	0,4997	0,8605	0,8143	0,7393	0,7627
K-FP [42]	0,7771	0,7417	0,6209	0,6313	0,8741	0,8653	0,7792	0,8167
GRAINES [44]	0,6914	0,5253	0,5346	0,5234	0,7895	0,6714	0,6615	0,6613
ETC-PS [12]	0,7486	0,6811	0,5929	0,6033	0,9155	0,8710	0,8311	0,8486
FS-net [20]	0,8286	0,7487	0,7197	0,7242	0,9278	0,8368	0,8254	0,8285
DF [19]	0,6514	0,4803	0,4767	0,4719	0,8568	0,8003	0,7415	0,7590
MT-FlowFormer [23]	0,8750	0,8252	0,8217	0,8220	0,8941	0,8742	0,8651	0,8670
GraphDApp [44]	0,4286	0,2557	0,2509	0,2281	0,6936	0,5447	0,5398	0,5352
ET-BERT(flux) [16]	0,9543	0,9242	0,9606	0,9397	0,9029	0,8560	0,8217	0,8332
Proposé	0,9386	0,9400	0,9386	0,9385	0,9503	0,9510	0,9503	0,9502

Dans ces tâches de classification, notre méthode a montré des améliorations significatives en termes d'exactitude , de précision, de rappel et de score F1 par rapport à ETC-PS, qui utilise également la signature de chemin. caractéristiques. Par rapport au modèle le plus performant, ET-BERT (flux), notre méthode la précision n'était inférieure que de 0,58 % dans l'environnement VPN et de 1,57 % dans les tâches de classification de l'environnement Tor. Cependant, il est essentiel de reconnaître que ET-BERT (flux) est un modèle pré-entraîné complexe et à grande échelle, contrastant fortement avec notre approche plus rationalisée en utilisant un modèle LSTM classique à petite échelle.

4.8.3. Analyse de performance

Pour évaluer de manière plus complète la complexité du modèle et les capacités informatiques ressources requises, nous avons utilisé des paramètres (Params), des opérations à virgule flottante (FLOP), le temps d'inférence et le temps de latence comme mesures d'évaluation. Les paramètres indiquent la somme cumulée de tous les poids et biais apprenables au sein d'un réseau neuronal, tandis que les FLOP font principalement référence à le nombre d'opérations arithmétiques en virgule flottante requises pendant le fonctionnement du réseau neuronal processus de propagation vers l'avant et vers l'arrière.

Dans notre expérience, nous avons utilisé un lot de 32 échantillons. Le temps nécessaire à la saisie le modèle permettant d'obtenir les résultats de prédiction est appelé temps d'inférence, alors que le temps de latence fait référence à la durée allant du chargement des 32 échantillons en mémoire jusqu'à l'obtention les résultats de la prédiction. Il est important de noter que le nombre de paramètres et de FLOP peuvent être utilisé uniquement pour évaluer des modèles d'apprentissage profond. Par conséquent, nous avons uniquement évalué les méthodes qui utiliser des modèles d'apprentissage profond.

Machine Translated by Google

Le tableau 8 présente les paramètres, les FLOP, le temps d'inférence et le temps de latence pour différents méthodes. Les données du tableau montrent clairement que notre méthode présente des avantages significatifs sous plusieurs aspects pour la même tâche de classification de trafic chiffré.

Tableau 8. La complexité des différentes méthodes.

Méthode	Paramètres (M)	FLOP (G)	Temps d'inférence (ms)	Temps de latence (ms)
FS-net [20]	2,17	24,86	39,94	45.72
DF [19]	1,83	3,06	29,57	33.56
MT-FlowFormer [23]	0,26	1,07	57,79	63.08
GraphDApp [44]	0,22	0,59	78,43	84,72
ET-BERT (flux) [16]	85,70	10,87	104,04	110,94
Proposé	0,03	7,32 × 10−4	4,02	5.56

Premièrement, notre méthode utilise beaucoup moins de paramètres (Params) que les autres méthodes. en termes de complexité du modèle. Cela signifie que la structure de notre modèle est plus concise et efficace, ce qui contribue à réduire le risque de surajustement tout en améliorant l'interprétabilité du modèle. et la maintenabilité.

Deuxièmement, en ce qui concerne les besoins en ressources informatiques, notre méthode nécessite moins opérations à virgule flottante (FLOP). Cela indique que notre modèle nécessite moins de calculs pendant la propagation vers l'avant et vers l'arrière, permettant des processus de formation et d'inférence plus rapides. Ceci est particulièrement important pour les applications à ressources limitées, telles que les applications embarquées. systèmes ou appareils mobiles.

De plus, notre méthode démontre des avantages évidents à la fois en termes de temps d'inférence et temps de latence. Le temps d'inférence est plus court et le temps de latence est inférieur. Cela indique que notre modèle est non seulement efficace sur le plan informatique, mais également très réactif, ce qui le rend adapté aux applications en temps réel ou quasi-réel. Compte tenu de tous ces facteurs, nous estimons le léger écart dans l'exactitude de la classification est acceptable.

Nous attribuons le temps d'inférence et le temps de latence courts de notre méthode aux éléments suivants deux raisons principales :

- Notre architecture de modèle est moins complexe et nécessite moins de calculs. ressources. En conséquence, les calculs sont effectués rapidement une fois les échantillons entrée dans le modèle, réduisant ainsi le temps d'inférence.
- Notre taille d'échantillon est relativement petite, avec une taille d'entrée de (1,23,56). De plus, le la charge de calcul sur le processeur est minime, permettant un transfert rapide des données depuis le CPU au GPU, réduisant ainsi le temps de latence.

4.8.4. Analyses statistiques

Pour valider davantage l'efficacité de notre méthode, nous avons utilisé le test de rang signé de Wilcoxon pour déterminer s'il existe des différences statistiquement significatives entre nos résultats de classification et ceux d'autres modèles. Le test de Wilcoxon signé-rank est un test largement utilisé une méthode statistique pour comparer deux ensembles de données [45]. Notre hypothèse nulle postule la suivante : « Les deux méthodes de détection ont les mêmes performances de classification ». Si la valeur p est supérieure à 0,05, nous acceptons l'hypothèse nulle. Si la valeur p est inférieure à 0,05, nous rejetons l'hypothèse nulle à un niveau de confiance de 95 %. Les valeurs p comparant notre La méthode proposée avec chaque modèle de base est présentée dans les tableaux 9 et 10.

Tableau 9. Les valeurs p comparant notre méthode à la construction d'empreintes digitales et aux méthodes statistiques.

Méthode	FlowPrint [17]	AppScanner [9]	CUMUL [35]	K-FP [42]	GRAINES [44]	ETC-PS [12]
valeur p	0,006956	0,036267	0,000186	0,005447	0,000104	0,041655

Tableau 10. Les valeurs p comparant notre méthode avec des modèles d'apprentissage profond.

Méthode	FS-Net [20]	DF [19]	MT-FlowFormer [23]	GraphDApp [44]	ET-BERT (Flux) [16]
valeur p	0,015764	0,000183	0,016351	0,000322	0,167007

Machine Translated by Google

Sur la base des résultats, nous pouvons conclure que les valeurs p pour toutes les méthodes comparées à notre méthode, à l'exception de ET-BERT, sont inférieures à 0,05. Cela indique que, à l'exception de ET-BERT, il existe des différences significatives dans les performances de classification entre notre méthode et les autres méthodes. Plus précisément, une valeur p inférieure à 0,05 signifie que nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle à un niveau de confiance de 95 %, ce qui implique que l'hypothèse selon laquelle les deux méthodes ont les mêmes performances de classification n'est pas valable.

Par conséquent, notre méthode surpasse considérablement les autres modèles de base en termes de performances de classification, à l'exception de ET-BERT. Pour ET-BERT, la valeur p est supérieure à 0,05, ce qui indique qu'il n'y a aucune différence statistiquement significative dans les performances de classification entre notre méthode et ET-BERT. Cela valide en outre l'efficacité de notre méthode, démontrant que les avantages de notre modèle en termes de complexité et de ressources de calcul ne se font pas au détriment des performances de classification.

5. Conclusions et travaux futurs

Dans cette étude, nous avons proposé une méthode qui combine les caractéristiques de signature de chemin avec un modèle LSTM pour classer les types de services de trafic chiffré en utilisant seulement 24 caractéristiques inter-trafic consécutives. Le cœur de notre méthode consiste à extraire des caractéristiques fondamentales (telles que la taille des paquets et l'heure d'arrivée) de la séquence de paquets de trafic chiffrés pour construire des chemins de trafic détaillés. Ces chemins subissent un processus de transformation et sont améliorés à l'aide de techniques d'extraction de caractéristiques cumulatives multi-échelles, générant finalement des caractéristiques de signature de chemin multi-échelles. Ces caractéristiques sont ensuite utilisées efficacement comme entrées dans le modèle LSTM, ce qui donne lieu à des résultats de classification précis.

Nous avons évalué notre méthode sur les ensembles de données ISCX VPN-nonVPN et ISCX Tor-nonTor accessibles au public. Les résultats expérimentaux ont montré des précisions de classification de 94,74 %, 90,53 %, 93,86 % et 95,03 % dans les environnements VPN, non-VPN, Tor et non-Tor, respectivement . Ces résultats sont comparables aux méthodes de l'état de l'art. De plus, nos expériences d'analyse des performances et d'analyse statistique ont démontré les avantages de notre méthode par rapport aux modèles de réseaux neuronaux à grande échelle.

Cependant, en tant que méthode de classification qui repose sur la longueur des paquets, notre approche, comme d'autres méthodes [12] basées sur des caractéristiques de longueur de paquet, est extrêmement limitée en efficacité contre le trafic chiffré qui utilise des techniques d'obscurcissement de la longueur des paquets telles que le remplissage de paquets [46]. Le remplissage des paquets constitue une défense efficace contre l'analyse du trafic, rendant toutes les longueurs de paquets identiques. L'exploration de fonctionnalités plus distinctes dans le trafic chiffré pourrait résoudre ce problème. De plus, notre modèle utilise une structure LSTM relativement simple ; il peut donc fonctionner mal lors du traitement de tâches de classification plus complexes dans le monde réel, ce qui indique la nécessité de classificateurs plus robustes.

Dans les travaux futurs, nous prévoyons d'élargir notre approche en utilisant davantage d'ensembles de données pour l'appliquer à des environnements réseau plus complexes. De plus, l'exploration de l'applicabilité de notre méthodologie au domaine de la détection d'anomalies de trafic reste un pilier central de nos futurs objectifs de recherche.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, YM et NL ; méthodologie, YM; logiciel, YM; validation , YM, GZ et XY ; analyse formelle, YM ; enquête, GZ; ressources, YM; conservation des données, XY ; rédaction – préparation du projet original, YM ; rédaction – révision et édition, YM ; visualisation, GZ ; supervision, T.-N.-L.; administration de projet, T.-N.-L.; acquisition de financement, NL Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Ce travail a été financé en partie par le Fonds national des sciences sociales de Chine sous la subvention 20&ZD293.

Déclaration de disponibilité des données : des ensembles de données accessibles au public ont été analysés dans cette étude. Ces données peuvent être trouvées ici : https://www.unb.ca/cic/datasets/vpn.html (consulté le 1er juin 2024).

Remerciements : Les auteurs souhaitent remercier les évaluateurs anonymes pour leur contribution à cet article.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Machine Translated by Google

Les références

1. Bader, O. ; Lichy, A. ; Hajaj, C. ; Dubin, R. ; Dvir, A. MalDIST : De la classification du trafic crypté à la détection et à la classification du trafic de logiciels malveillants. Dans les actes de la 19e conférence annuelle de l'IEEE sur les communications et les réseaux de consommation (CCNC), Las Vegas, NV, États-Unis, du 8 au 11 janvier 2022 ; pp. 527-533.
2. Wang, Y. ; Il h.; Lai, Y. ; Liu, AX Une approche en deux phases pour une classification rapide et précise du trafic crypté. IEEE/ACM Trans. Réseau. 2023, 31, 1071-1086. [Référence croisée]
3. Wang, W. ; Zhu, M. ; Wang, J. ; Zeng, X. ; Yang, Z. Classification du trafic crypté de bout en bout avec des réseaux neuronaux à convolution unidimensionnels . Dans les actes de la conférence internationale IEEE 2017 sur l'intelligence et l'informatique de sécurité (ISI), Pékin, Chine, 22-24 juillet 2017 ; p. 43-48.
4. Shen, M. ; Liu, Y. ; Zhu, L. ; Xu, K. ; Du, X. ; Guizani, N. Optimisation de la sélection des fonctionnalités pour une classification efficace du trafic crypté : une approche systématique. Réseau IEEE. 2020, 34, 20-27. [Référence croisée]
5. Karagiannis, T. ; Papagiannaki, K. ; Faloutsos, M. BLINC : Classification du trafic à plusieurs niveaux dans l'obscurité. Calcul ACM SIGCOMM. Commun. Rév.2005 , 35, 229-240. [Référence croisée]
6. Lotfollahi, M. ; Jafari Siavoshani, M. ; Shirali Hossein Zade, R. ; Saberian, M. Deep packet : Une nouvelle approche pour la classification du trafic crypté utilisant l'apprentissage profond. Informatique douce. 2020, 24, 1999-2012. [Référence croisée]
7. Al-Naami, K. ; Chandra, S. ; Mustafa, A. ; Khan, L. ; Thuraisingham, BM Empreinte digitale adaptative du trafic crypté avec dépendance bidirectionnelle. Dans Actes de la Conférence sur les applications de sécurité informatique, Los Angeles, Californie, États-Unis, 5-9 décembre 2016.
8. Taylor, VF; Spolaor, R. ; Conti, M. ; Martinovic, I. Identification robuste des applications pour smartphone via une analyse du trafic réseau crypté. IEEETrans. Inf. Sécurité médico-légale. 2018, 13, 63-78. [Référence croisée]
9. Taylor, VF; Spolaor, R. ; Conti, M. ; Martinovic, I. AppScanner : Empreinte digitale automatique des applications de smartphone à partir du trafic réseau crypté. Dans les actes du Symposium européen de l'IEEE 2016 sur la sécurité et la confidentialité (EuroS&P), Saarbrucken, Allemagne, 21-24 mars 2016 ; pp. 439-454.
10. Xie, G. ; Li, Q. ; Jiang, Y. Méthode d'apprentissage profond auto-attentif pour la classification du trafic en ligne et son interprétabilité. Calculer. Réseau. 2021, 196, 108267. [CrossRef]
11. Chen, KT Intégration des chemins – Une représentation fidèle des chemins par des séries de puissances formelles non commutatives. Trans. Suis. Mathématiques. Soc. 1958, 89, 395-407. [Référence croisée]
12. Xu, S.-J. ; Geng, G.-G.; Jin, X.-B.; Liu, DJ ; Weng, J. Voir les chemins de trafic : classification du trafic crypté avec fonctionnalités de signature de chemin. IEEETrans. Inf. Sécurité médico-légale. 2022, 17, 2166-2181. [Référence croisée]
13. Yamansavascilar, B. ; Guvensan, MA; Yavuz, AG; Karsligil, ME Identification des applications via la classification du trafic réseau. Dans Actes de la Conférence internationale 2017 sur l'informatique, les réseaux et les communications (ICNC), Silicon Valley, Californie, États-Unis, 26-29 janvier 2017 ; pp. 843-848.
14. Chen, RTQ; Rubanova, Y. ; Bettencourt, J. ; Duvenaud, DK Équations différentielles ordinaires neuronales. Av. Informations neuronales. Processus. Système. 2018, 31, 07366.
15. Dainotti, A. ; Pescape, A. ; Claffy, KC Problèmes et orientations futures en matière de classification du trafic. Réseau IEEE. 2012, 26, 35-40. [Référence croisée]
16. Lin, X. ; Xiong, G. ; Gou, G. ; Li, Z. ; Shi, J. ; Yu, J. Et-bert : Une représentation de datagramme contextualisée avec des transformateurs de pré-formation pour la classification du trafic crypté. Dans Actes de la Web Conference ACM 2022, Lyon, France, 25-29 avril 2022 ; pp. 633-642.
17. Van Ede, T. ; Bortolameotti, R. ; Continella, A. ; Ren, J. ; Dubois, DJ; Linddorfer, M. ; Choffnes, D. ; van Steen, M. ; Peter, A. Flowprint : Empreintes digitales d'applications mobiles semi-supervisées sur le trafic réseau crypté. Dans Actes du Symposium sur la sécurité des réseaux et des systèmes distribués (NDSS), San Diego, Californie, États-Unis, 23-26 février 2020.
18. Biju, VG ; Évaluations de Prashanth, C. Friedman et Wilcoxon comparant SVM, bagging, boosting, K-NN et arbre de décision classificateurs. J.Appl. Calculer. Sci. Méthodes 2017, 9, 23-47. [Référence croisée]
19. Sirinam, P. ; Imani, M. ; Juarez, M. ; Wright, M. Empreintes digitales profondes : affaiblir les défenses liées aux empreintes digitales des sites Web grâce à l'apprentissage en profondeur. Dans Actes de la conférence ACM SIGSAC 2018 sur la sécurité informatique et des communications, Toronto, ON, Canada, 15-19 octobre 2018 ; pages 1928-1943.
20. Liu, C. ; Lui, L. ; Xiong, G. ; Cao, Z. ; Li, Z. Fs-net : Un réseau de séquence de flux pour la classification du trafic crypté. Dans Actes de la conférence IEEE INFOCOM 2019-IEEE sur les communications informatiques, Paris, France, 29 avril-2 mai 2019 ; pages 1171 à 1179.
21. Lin, K. ; Xu, X. ; Gao, H. TSCRNN : Un nouveau schéma de classification du trafic chiffré basé sur les caractéristiques spatio-temporelles du flux pour gestion efficace de l'IIoT. Calculer. Réseau. 2021, 190, 107974. [Réf. croisée]
22. Zhang, H. ; Yu, L. ; Xiao, X. ; Li, Q. ; Mercaldo, F. ; Luo, X. ; Liu, Q. TFE-GNN : un encodeur de fusion temporelle utilisant des réseaux de neurones graphiques pour une classification du trafic crypté à grain fin. Dans Actes de la conférence Web ACM 2023, Austin, Texas, États-Unis, 30 avril-1er mai 2023 ; pages 2066 à 2075.
23. Zhao, R. ; Deng, X. ; Yan, Z. ; Maman, J. ; Xue, Z. ; Wang, Y. Mt-flowformer : Un transformateur de flux semi-supervisé pour la classification du trafic crypté. Dans Actes de la 28e conférence ACM SIGKDD sur la découverte des connaissances et l'exploration de données, Washington, DC, États-Unis, 14-18 août 2022 ; pages 2576 à 2584.
24. Graham, B. Tableaux clairsemés de signatures pour la reconnaissance de caractères en ligne. arXiv 2013, arXiv : 1308.0371.
25. Gyurkó, LG ; Lyon, T. ; Kontkowski, M. ; Field, J. Extraire des informations de la signature d'un flux de données financières. arXiv 2013, arXiv : 1307.7244.

Machine Translated by Google

26. Pérez Arribas, I. ; Goodwin, directeur général ; Geddes, JR ; Lyon, T. ; Saunders, KE Un modèle d'apprentissage automatique basé sur les signatures pour distinguer le trouble bipolaire du trouble de la personnalité limite. Trad. Psychiatrie 2018, 8, 274. [CrossRef] [Pub Med]
27. Hambly, B. ; Lyons, T. Unicité pour la signature d'un chemin à variation bornée et du groupe de chemin réduit. Anne. Mathématiques. 2010, 171, 109-167. [Référence croisée]
28. Hochreiter, S. ; Schmidhuber, J. Mémoire longue à court terme. Calcul neuronal. 1997, 9, 1735-1780. [Référence croisée]
29. Shen, S. ; Han, T. ; Pang, J. Prédiction du coefficient de traînée de voiture à l'aide d'un réseau neuronal à mémoire long-court terme et de LASSO. Mesure 2024, 225, 113982. [CrossRef]
30. Yeganeh, A. ; Ahmadi, F. ; Wong, YJ; Shadman, A. ; Barati, R. ; Saeedi, R. Modèles d'apprentissage peu profonds et profonds pour la prévision du niveau des eaux souterraines : une approche d'intégration de données multi-piézomètre. Eau Air Sol. Polluer. 2024, 235, 441. [Référence croisée]
31. Zhao, L. ; Farhi, N. ; Valéro, Y. ; Christoforou, Z. Réseaux neuronaux à mémoire longue et courte pour la modélisation du comportement de conduite humaine. Transp. Rés. Procédia 2023, 72, 2589-2596. [Référence croisée]
32. Eswarsaï. Explorer différents types de LSTM. Disponible en ligne : https://medium.com/analytics-vidhya/exploring-différent-types-of-lstms-6109bcb037c4 (consulté le 28 juillet 2024).

33. Soleil, Y. ; Wang, X. ; Tang, X. Les représentations de visages profondément apprises sont clairsemées, sélectives et robustes. Dans Actes de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes 2015, Boston, MA, États-Unis, 7-12 juin 2015 ; pages 2892 à 2900.
34. Vaswani, A. ; Shazeer, N. ; Parmar, N. ; Uszkoreit, J. ; Jones, L. ; Gomez, AN; Kaiser, Ł.; Polosukhin, I. L'attention est tout ce dont vous avez besoin. Dans Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems 30, Long Beach, Californie, États-Unis, 4-9 décembre 2017 ; pages 5998 à 6008.

35. Panchenko, A. ; Lanze, F. ; Pennekamp, J. ; Engel, T. ; Zinnen, A. ; Henze, M. ; Wehrle, K. Empreintes digitales de sites Web à l'échelle Internet. Dans Actes du NDSS 2016, San Diego, Californie, États-Unis, 21-24 février 2016.
36. Chawla, Nevada ; Bowyer, KW; Hall, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE : Technique de suréchantillonnage des minorités synthétiques. J.Artif. Intell. Rés. 2002, 16, 321-357. [Référence croisée]
37. Wilson, DL Propriétés asymptotiques des règles du voisin le plus proche utilisant des données éditées. IEEETrans. Système. Homme Cybern. 1972, 2, 408-421. [Référence croisée]
38. Batista, GE; Prati, RC; Monard, MC Une étude du comportement de plusieurs méthodes d'équilibrage des données de formation d'apprentissage automatique. ACM SIGKDD Explorateur. Actualités. 2004, 6, 20-29. [Référence croisée]
39. Draper-Gil, G. ; Lashkari, AH ; Mamun, MSI ; Ghorbani, AA Caractérisation du trafic crypté et VPN en fonction du temps. Dans Actes de la 2e Conférence internationale sur la sécurité et la confidentialité des systèmes d'information (ICISSP), Rome, Italie, 19-21 février 2016 ; pp. 407-414.

40. Lashkari, AH ; Gil, DG ; Mamun, MSI ; Ghorbani, AA Caractérisation du trafic tor à l'aide de fonctionnalités basées sur le temps. Dans Actes de la Conférence internationale sur la sécurité et la confidentialité des systèmes d'information, Rome, Italie, 29-31 mai 2017 ; pp. 253-262.
41. Shapira, T. ; Shavitt, Y. FlowPic : Une représentation générique pour la classification du trafic crypté et l'identification des applications. IEEETrans . Réseau. Servir. Gérer. 2021, 18, 1218-1232. [Référence croisée]
42. Hayes, J. ; Danezis, G. k-fingerprinting : Une technique robuste et évolutive d'empreintes digitales de sites Web. Dans les actes du 25e USENIX Symposium sur la sécurité (USENIX Security 16), Austin, Texas, États-Unis, 10-12 août 2016 ; pages 1187 à 1203.
43. Zaki, F. ; Afifi, F. ; Abd Razak, S. ; Gani, A. ; Anuar, NB GRAIN : Classification granulaire du trafic crypté multi-étiquettes à l'aide d'un classificateur chaîne. Calculer. Réseau. 2022, 213, 109084. [Réf. croisée]
44. Shen, M. ; Zhang, J. ; Zhu, L. ; Xu, K. ; Du, X. Identification précise des applications décentralisées via une analyse du trafic crypté à l'aide représenter graphiquement les réseaux de neurones. IEEETrans. Inf. Sécurité médico-légale. 2021, 16, 2367-2380. [Référence croisée]
45. Soleil, P. ; Li, S. ; Xie, J. ; Xu, H. ; Cheng, Z. ; Yang, R. GPMT : Génération de trafic malveillant pratique basé sur des attaques contradictoires avec peu de connaissances préalables. Calculer. Sécurisé. 2023, 130, 103257. [Réf. croisée]
46. Yu, S. ; Zhao, G. ; Dou, W. ; James, S. Remplissage de paquets prévu pour la navigation Web anonyme contre les attaques d'analyse du trafic. IEEETrans . Inf. Sécurité médico-légale. 2012, 7, 1381-1393. [Référence croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.

Machine Translated by Google

électronique

MDPI

Article

Détection d'intrusion réseau basée sur Deep Belief Network Large système d'apprentissage par péréquation

Miaolei Deng [1,2,*], Soleil de Chuanchuan [1,2], Yupei Kan [1,2], Haihang Xu [1,2], Xin Zhou [1,2] et Shaojun Fan [1,2]

[1] Collège des sciences et de l'ingénierie de l'information, Université de technologie du Henan, Zhengzhou 450001, Chine ; scc@stu.haut.edu.cn (CS) ; 2022930951@stu.haut.edu.cn (YK); 2022930927@stu.haut.edu.cn (HX); 2023930889@stu.haut.edu.cn (XZ); 2023930813@stu.haut.edu.cn (SF)

[2] Laboratoire commun international du Henan pour le traitement de l'information sur les grains, Zhengzhou 450001, Chine

* Correspondance : dengmiaolei@haut.edu.cn

Résumé : Les systèmes de détection d'intrusion réseau constituent une technologie de défense importante pour garantir la sécurité des informations et protéger un réseau contre les attaques. Ces dernières années, le système d'apprentissage général a attiré beaucoup d'attention et a été introduit avec un certain succès dans les systèmes de détection d'intrusion. Cependant, étant donné que le système d'apprentissage large traditionnel est une structure linéaire simple, lorsqu'il traite des ensembles de données déséquilibrés, il ignore souvent l'apprentissage des caractéristiques des échantillons de classes minoritaires, ce qui conduit à un taux de reconnaissance plus faible des échantillons de classes minoritaires. Deuxièmement, la haute dimensionnalité et les fonctionnalités redondantes des ensembles de données de détection d'intrusion affectent également sérieusement le temps de formation et les performances de détection du système d'apprentissage étendu traditionnel. Pour résoudre les problèmes ci-dessus, nous proposons un système d'apprentissage d'égalisation à grande échelle en réseau de croyances profondes. Le modèle apprend pleinement l' ensemble de données de grande dimension à grande échelle via un réseau de croyances profondes et le représente comme un ensemble de données optimal de faible dimension, puis introduit l'idée de repesage de perte d'égalisation v2 dans le système d'apprentissage général et apprend à classer les données de faible dimension. ensemble de données via un vaste système d'apprentissage par péréquation. Le modèle a été testé expérimentalement à l'aide de l'ensemble de données CICIDS2017 et entièrement validé à l'aide de l'ensemble de données CICIDS2018. Comparé à d'autres algorithmes dans le même domaine, le modèle réduit le temps de formation et présente un taux de détection élevé et un faible taux de fausses alarmes.

Mots-clés : système de détection d'intrusion réseau ; système d'apprentissage étendu; ensembles de données déséquilibrés ; perte d'égalisation v2 ; CICIDS2017 ; CICIDS2018

check for updates

Référence : Deng, M. ; Soleil, C. ; Kan, Y. ; Xu, H. ; Zhou, X. ; Fan, S. Réseau Détection d'intrusion basée sur le système d'apprentissage d'égalisation étendu du réseau Deep Belief. Électronique 2024, 13, 3014. https://doi.org/10.3390/électronique13153014

Rédacteur académique : Rajendra V. Boppana

Reçu : 17 juin 2024
Révisé : 26 juillet 2024
Accepté : 28 juillet 2024
Publié : 31 juillet 2024

Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Avec le développement rapide de la technologie informatique moderne et des technologies de l'information sur les réseaux, les réseaux affectent tous les aspects de nos vies, les attaques réseau sont devenues de plus en plus complexes et la sécurité des réseaux n'a jamais été aussi importante. Bien qu'Internet ait apporté beaucoup de commodité aux gens, il est également confronté à de nombreux nouveaux défis Les problèmes de sécurité des réseaux deviennent de plus en plus graves, tels que les sites Web de phishing, les attaques par déni de service distribué et les vers de réseau qui menacent la sécurité du réseau. Les systèmes de détection d'intrusion dans les réseaux (NIDS) ont été proposés par Anderson [1] en 1980. Le principe de fonctionnement d'un système de détection d'intrusion consiste principalement à surveiller et filtrer les comportements du réseau en analysant les données d'audit de l'hôte, les données de trafic réseau et d'autres caractéristiques , en identifiant les accès anormaux dans les communications réseau et en informant rapidement les administrateurs réseau, afin d'atteindre l'objectif de assurer la sécurité des informations sur le réseau.

Ces dernières années, en raison du développement fulgurant de l'intelligence artificielle, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent mieux gérer des données complexes pour l'apprentissage automatisé par rapport aux systèmes de détection d'intrusion traditionnels et ont une meilleure adaptabilité et généralisation. Par conséquent, de plus en plus de chercheurs ont introduit la technologie d'apprentissage automatique dans le système de détection d'intrusion [2] et ont obtenu des succès [3]. Cependant, les modèles d'apprentissage automatique traditionnels fonctionnent mal lorsqu'il s'agit de gérer des problèmes complexes et de grande dimension.

Machine Translated by Google

données [4], et la robustesse du modèle d'apprentissage automatique limite les performances du modèle [5]. L'apprentissage profond peut automatiquement extraire et apprendre pleinement les caractéristiques complexes des données pour atteindre une précision et une robustesse élevées, et ainsi, les techniques d'apprentissage profond sont largement utilisées dans les systèmes de détection d'intrusion [6]. Cependant, le processus de formation du modèle d'apprentissage profond est gourmand en ressources informatiques, avec de longs temps de formation et une consommation d'énergie élevée [7]. De plus, les modèles d'apprentissage profond sont généralement des modèles de boîte noire qui manquent d'interprétabilité, ce qui rend difficile la compréhension et l'explication de leur processus décisionnel interne, ce qui nuit aux performances des systèmes de détection d'intrusion. De plus, la robustesse des modèles d'apprentissage profond limite également la sécurité des systèmes de détection d'intrusion. Abbas et coll. [8] ont mené une étude approfondie sur la robustesse des modèles et ont obtenu un certain succès. De plus en plus de chercheurs [9] commencent à adopter de nouvelles techniques dans le domaine de la détection des intrusions.

Récemment, Chen et al. [10] ont proposé un nouveau réseau neuronal randomisé appelé système d'apprentissage large (BLS), basé sur une architecture de réseau plat. Ce modèle est différent de la structure d'apprentissage profond étendu en profondeur dans la mesure où il n'a pas besoin d'utiliser la descente de gradient pour mettre à jour les poids, et la structure du réseau est de petite taille et donc plus rapide en termes de calcul [11]. De plus, la mise à jour des poids BLS est basée sur des opérations pseudo-inverses avec une meilleure interprétabilité et évolutivité du modèle. Par conséquent, certaines personnes ont introduit le BLS dans les systèmes de détection d'intrusion avec de bons résultats [12]. Cependant, d' une part, les ensembles de données NIDS ont tendance à être gravement déséquilibrés, et les modèles BLS traditionnels ne peuvent pas bien gérer les ensembles de données déséquilibrés, ce qui conduit à de très mauvaises performances de détection pour les classes d'attaques minoritaires, ce qui est fatal pour les systèmes de détection d'intrusion détectant les attaques. D'un autre côté, les ensembles de données NIDS ont tendance à avoir une dimensionnalité élevée et à contenir davantage d'informations redondantes, ce qui peut entraîner une plus grande consommation de temps et des performances de détection inférieures du modèle BLS. Par conséquent, certaines mesures doivent être utilisées pour résoudre ces problèmes afin d' améliorer les performances de détection du modèle.

Pour le problème du déséquilibre des ensembles de données dans la détection d'intrusion, la solution traditionnelle consiste à modifier le nombre d'échantillons de classe minoritaire ou d'échantillons de classe majoritaire par suréchantillonnage ou sous-échantillonnage pour égaliser les échantillons. Par exemple, la technique de suréchantillonnage synthétique des minorités (SMOTE) [13] augmente le nombre d'échantillons de classes minoritaires en synthétisant de nouveaux échantillons de classes minoritaires pour équilibrer le nombre d'échantillons de différentes classes dans l'ensemble de données. Cependant, les échantillons générés par SMOTE peuvent élargir l' espace d'échantillon d'origine et modifier la distribution des données d'échantillon, conduisant à une mauvaise classification ou même à une confusion du modèle dans la région limite, et entraînant souvent plus de temps en raison de l'introduction de nouveaux échantillons. . Pour le problème de la haute dimensionnalité des ensembles de données dans la détection d'intrusion, la méthode traditionnelle est basée sur la réduction de dimensionnalité de l'analyse en composantes principales (ACP) [14]. Bien qu'elle puisse réduire la dimensionnalité de l' ensemble de données, en tant que méthode de réduction de dimensionnalité linéaire, elle ne peut trouver que la structure de corrélation linéaire dans les données, et pour la structure non linéaire des ensembles de données de détection d'intrusion, la PCA ne peut pas capturer efficacement ces informations, et son la réduction de la dimensionnalité est obtenue en projetant les données dans un nouvel espace de faible dimension, ce qui entraîne souvent une grave perte d' informations dans les données d'origine.

Pour résoudre les problèmes ci-dessus, nous proposons un système d'apprentissage à large égalisation (DBELS) sur un réseau de croyances profondes, dans lequel le réseau de croyances profondes (DBN) effectue une réduction de dimensionnalité des données sur l'ensemble de données NIDS afin d'éliminer les informations redondantes. L'idée de perte d'égalisation v2 (EQL v2) est introduite dans le BLS, et le modèle équilibre les différentes classes d'échantillons en ajustant les facteurs de gradient positifs et négatifs pour améliorer les performances de détection des échantillons d'attaque des classes minoritaires et classifie les ensembles de données de faible dimension pour atteindre l'objectif de classifier et de détecter les attaques. Les principales contributions de cet article sont les suivantes. • Nous

introduisons l'idée EQL v2 dans le BLS et proposons un nouveau modèle en ajoutant des facteurs de gradient positifs et négatifs et en recalculant ses poids, ce qui améliore la faible capacité d'apprentissage du modèle BLS pour les échantillons de classes minoritaires en ajustant les facteurs de gradient positifs et négatifs et atténue le défaut du modèle BLS dans

Machine Translated by Google

qu'il n'est pas efficace pour gérer un ensemble de données déséquilibré, pour améliorer les performances de détection des échantillons de classes
minoritaires. • Nous avons évalué deux types de modèles de réduction de dimensionnalité basés sur DBN – le modèle DBN traditionnel et le modèle DeBN qui introduit l'idée d'EQL v2 – et comparé expérimentalement les effets des modèles de réduction de dimensionnalité à deux dimensions sur l'effet de classification.

• Nous avons mené de nombreuses expériences sur le modèle DBELS sur la base de l' ensemble de données de référence accessible au public CICIDS2017, fournissant des configurations expérimentales détaillées, notamment une classification binaire et multi-classification, et évaluant le modèle en termes de précision, de rappel, de taux de faux positifs, de temps et de fonctionnement du récepteur. courbes caractéristiques, trouvant des avantages évidents par rapport aux autres modèles. Nous avons également testé l'effet des hyperparamètres sur le modèle à travers de nombreuses expériences et mené des analyses comparatives avec d'autres modèles de
pointe. • Nous avons en outre validé la pertinence et l'évolutivité du modèle proposé avec l'ensemble de données CI-CIDS2018. Les performances et l'utilité du modèle proposé ont été évaluées par analyse comparative avec d'autres modèles.

Le reste de cet article est organisé comme suit : La section 2 passe en revue les recherches actuelles sur les systèmes de détection d'intrusion basés sur le BLS, la réduction de la dimensionnalité des données et le déséquilibre des données. Dans la section 3, nous décrivons les détails du DBELS proposé. Des résultats expérimentaux détaillés sont rapportés et analysés dans les sections 4 et 5. La section 6 conclut cet article.

2. Travaux connexes

Cette section se concentre sur l'état actuel de la recherche et les lacunes du système de détection d'intrusion réseau (NIDS) basé sur le système d'apprentissage étendu (BLS). Nous apportons des solutions traditionnelles aux limites du BLS traditionnel et analysons les avantages et les inconvénients de ces méthodes.

2.1. NIDS basé sur BLS

Le modèle BLS est un modèle de réseau superficiel qui transforme et apprend les fonctionnalités en mappant des nœuds et des nœuds d'amélioration et calcule rapidement les poids du modèle par des opérations pseudo-inverses, ce qui rend la formation simple et rapide. Lorsqu'il a été proposé, l'apprentissage généralisé a suscité un large intérêt et ses applications sont étudiées dans de nombreux domaines de recherche, tels que la vision par ordinateur, le traitement d'images, l'analyse de données médicales et le traitement du langage naturel. Il existe également quelques travaux dans le domaine de la détection d'intrusion sur les réseaux. Li et coll. [15] ont proposé un modèle hybride de détection d'intrusion basé sur le réseau neuronal récurrent (RNN) et le BLS, et les résultats expérimentaux montrent que le modèle basé sur le BLS a un meilleur effet d'entraînement et un temps d'entraînement plus court. Laura et coll. [16] ont implémenté la cascade de nœuds de mappage de fonctionnalités, une cascade de nœuds d'amélioration et une cascade de nœuds de mappage de fonctionnalités et de nœuds d'amélioration.
Les auteurs ont conclu que la cascade de nœuds d'amélioration nécessite un temps de formation plus long que les autres variantes du BLS. Par la suite, ils ont proposé un système de détection DDoS basé sur un large apprentissage pour les réseaux de communication [17]. Les auteurs ont conclu que les meilleures performances de détection peuvent généralement être obtenues en utilisant un BLS en cascade. Li et coll. [18] ont proposé un système d'apprentissage tri-broad (TBLS) basé sur le modèle BLS, qui apprend des caractéristiques à partir de trois dimensions de granularité temporelle, de contenu des données et de granularité spatiale de l' ensemble de données. Expérimentalement, il a été prouvé que le modèle TBLS peut obtenir de meilleures performances de détection en apprenant les caractéristiques des trois dimensions.

Bien que le modèle BLS ait connu un certain succès dans le domaine de la détection d'intrusion, en tant que réseau neuronal superficiel, il s'appuie trop sur la topologie, le nombre d'échantillons et les informations de classe des échantillons d'apprentissage, et est incapable de gérer des ensembles de données déséquilibrés. Cela l'amène à accorder trop d'attention aux échantillons de classe majoritaires et à ignorer presque l'apprentissage des échantillons de classe minoritaire lors de l'apprentissage de la classification, ce qui conduit à de mauvaises performances de détection sur des ensembles de données déséquilibrés, en particulier pour la minorité.

Machine Translated by Google

des échantillons de classe, qui sont pires, voire indétectables. Deuxièmement, les ensembles de données de grande dimension augmentent la complexité des modèles BLS et augmentent les coûts de calcul et de stockage. De plus, plus la dimensionnalité des données est élevée, plus l'influence du bruit et des fonctionnalités redondantes est grande, ce qui peut masquer des informations utiles et réduire la précision et la stabilité du modèle BLS. Par conséquent, certaines techniques sont nécessaires pour adapter le BLS à des ensembles de données déséquilibrés et de grande dimension pour la détection des intrusions.

2.2. NIDS basé sur le déséquilibre des données

Le déséquilibre des données fait référence au fait que dans le monde réel, différentes classes de données ont des distributions différentes, où certains types de données sont considérablement sous-représentés, ce qui a un impact négatif sérieux sur la classification des modèles. Les ensembles de données de détection d'intrusion sont souvent très déséquilibrés, ce qui est fatal aux performances d'entraînement et de détection du modèle ; par exemple, dans le cas du CICIDS2017, le comportement normal du Bénin représente 82,248 % et le comportement anormal de l'Attaque ne représente que 17,752 %. Les échantillons d'attaques DoS/DDoS représentent 14,571 %, Port Scan représente 2,607 %, Brute Force représente 0,389 %, Web Attack représente 0,096 % et Botnet représente 0,088 % ; ainsi, il est évident que la classe normale d'échantillons est bien plus que la classe d'attaque des échantillons, ce qui amènera le modèle à trop apprendre les échantillons de la classe majoritaire. En réponse au déséquilibre des ensembles de données de détection d'intrusion, certains chercheurs ont déjà mené des études a Wu T et coll. [13] ont abordé les données déséquilibrées dans la détection d'intrusion sur le réseau en utilisant le clustering k-means et la technique de suréchantillonnage synthétique des minorités (SMOTE). Ils ont regroupé les données, identifié les groupes de classes minoritaires et appliqué SMOTE pour générer des échantillons synthétiques, démontrant ainsi l'efficacité des expériences. Ahmad T et coll. [19] ont développé un modèle hybride combinant sélection de caractéristiques et exploration de modèles. Ils ont utilisé une analyse basée sur des règles pour la réduction de la dimensionnalité, SMOTE pour équilibrer les données et un renforcement adaptatif (AdaBoost) pour l'apprentissage, détectant efficacement les échantillons de classes minoritaires. Grâce aux progrès de l'apprentissage profond, Hao X et al. [20] ont utilisé les GAN pour créer des ensembles de données synthétiques, améliorant ainsi les performances du classificateur sur les classes minoritaires grâce à une génération de données réalistes.

Cependant, la plupart des méthodes utilisées pour résoudre le problème de déséquilibre des données dans la détection d'intrusion sont basées sur la génération de données, qu'il s'agisse de générer des échantillons de classe minoritaire par suréchantillonnage ou de réduire les échantillons de classe majoritaire par sous-échantillonnage, ce qui équilibre les différents échantillons. en changeant le numéro de l'ensemble de données ; cependant, cela modifie la distribution des données d'origine, ce qui peut affecter l'effet d'apprentissage du modèle pour classer l'ensemble de données. De plus, la méthode de suréchantillonnage augmentera le nombre d'ensembles de données, ce qui augmentera le coût de calcul supplémentaire du modèle et entraînera une consommation de temps supplémentaire. Ces dernières années, Jin et al. [21] ont proposé la perte d'égalisation v2 (EQL v2), qui est guidée par des gradients positifs et négatifs et réajuste les poids pour équilibrer l'apprentissage de chaque type de tâche et améliorer l'apprentissage des échantillons de classes minoritaires, et a obtenu certains résultats . Puisqu'il ne modifie pas la distribution et le nombre des échantillons d'origine et ajuste les poids afin que le modèle apprenne chaque classe d'échantillons de manière plus équilibrée, cela revêt une grande importance pour résoudre le problème de déséquilibre des systèmes de détection d'intrusion et introduire ce problème. Cette idée dans le BLS est propice à l' amélioration des performances de détection du modèle face à des ensembles de données déséquilibrés.

2.3. NIDS basé sur la réduction de la dimensionnalité des

données Les chercheurs ont proposé des solutions pour faire face au problème de haute dimensionnalité dans le domaine de la détection d'intrusion. Zhang B et coll. [14] ont proposé une méthode de détection d'intrusion utilisant une analyse en composantes principales (ACP) améliorée combinée à l'algorithme bayésien simple gaussien. En pondérant les vecteurs de caractéristiques principales dans PCA, la méthode réduit la contamination des données. Cette approche, suivie de l'algorithme bayésien de détection, réduit considérablement le temps de détection par rapport à l'utilisation de classificateurs seuls. Shen Z et coll. [22] ont introduit un algorithme de classification bayésienne naïve amélioré qui intègre l'analyse en composantes principales avec l'analyse discriminante linéaire pour réduire la dimensionnalité de l'espace d'échantillonnage et affine le calcul bayésien en incorporant des attributs.

Machine Translated by Google

corrélation. Cette approche permet au classificateur de prendre en compte à la fois les problèmes de fréquence et de corrélation des attributs, répondant ainsi aux défis de temps réel et de précision dans la détection d'intrusion avec de nombreuses fonctionnalités. Salo F et coll. [23] ont développé une technique d'intégration de traitement de caractéristiques qui combine le gain d'informations et l'analyse des composantes principales pour extraire un sous-espace optimal de faible dimension. Ils fusionnent ensuite plusieurs classificateurs à l'aide de machines à vecteurs de support, d'algorithmes d'apprentissage d'instance et de stratégies de décision à perceptrons multicouches, en utilisant une règle de combinaison moyenne de probabilité pour le vote. Les tests effectués sur divers ensembles de données ont démontré que cette méthode permet non seulement d'obtenir une grande précision, mais réduit également considérablement les coûts de calcul, ce qui la rend plus efficace pour la détection de données à grande échelle.

Cependant, la plupart des solutions actuelles au problème de la haute dimensionnalité dans les ensembles de données NIDS sont des algorithmes d'apprentissage automatique, qui réduisent dans une certaine mesure la dimensionnalité de l'ensemble de données, mais présentent toujours de plus grandes limites face aux caractéristiques non linéaires de haute dimensionnalité . , ce qui entraîne un taux de détection plus faible du modèle. Étant donné que les algorithmes d'apprentissage profond sont efficaces pour apprendre la haute dimensionnalité et que les fonctionnalités non linéaires peuvent compléter de manière autonome l'apprentissage et l'extraction de caractéristiques des données brutes sans trop d'intervention humaine, des algorithmes d'apprentissage profond ont été introduits dans les systèmes de détection d'intrusion à grande échelle , qui peuvent mieux terminer l'extraction et la réduction dimensionnelle des caractéristiques des données. Le réseau de croyance profonde (DBN), en tant que modèle représentatif d'apprentissage profond, a été proposé par Geoffrey Hinton et al. [24] en 2006. À partir des données brutes, il peut apprendre les représentations de caractéristiques abstraites multicouches qui capturent efficacement la structure complexe et les modèles changeants des données. Ce processus d'extraction de caractéristiques hiérarchiques permet de mapper des données d'entrée de grande dimension sur un espace de représentation de faible dimension tout en préservant les informations importantes des données pour la réduction de dimensio
Par rapport aux méthodes traditionnelles de réduction de dimensionnalité, la réduction de dimensionnalité DBN non seulement maintient mieux la structure et la pertinence des données, mais apprend également de manière adaptative les relations non linéaires dans les données, ce qui améliore la capacité d'expression et les performances de classification des données réduites. Par conséquent, le DBN est supérieur dans la tâche de réduction de dimensionnalité des modèles de détection d'intrusion.

3. Méthodologie

Cette section construit le système d'apprentissage à large égalisation du réseau de croyances profondes (DBELS) basé sur BLS, EQL v2 et DBN en détail en trois étapes : prétraitement des données, réduction de la dimensionnalité des données et classification du modèle.

3.1. Architecture DBELS

Le cadre du DBELS est illustré à la figure 1, qui est divisé en trois étapes.
La première étape est le prétraitement des données, qui traite principalement les données originales sous une forme de données adaptée à la réduction de dimensionnalité du DBN. L'ensemble de données CICIDS2017 contient 79 fonctionnalités contenant de nombreuses fonctionnalités redondantes qui entravent la formation et la classification du modèle. Dans cet article, le prétraitement des données comprend deux parties : le nettoyage des données et la standardisation des données. Le but du nettoyage des données est de réduire les caractéristiques redondantes en calculant la contribution des caractéristiques à la classification via des coefficients de corrélation, d'éliminer les mauvaises valeurs des données et d'éviter leur effet d'interférence négatif sur le modèle.
Le but de la standardisation des données est de faire en sorte que le modèle se concentre sur différentes caractéristiques des données de manière équilibrée, tout en ignorant l'influence des caractéristiques ayant des poids différents sur le modèle en raison de la taille de la valeur. En raison du grave déséquilibre des données dans l'ensemble de données CICIDS2017, la méthode de suréchantillonnage SMOTE peut être utilisée pour augmenter les échantillons d'attaque minoritaires lorsque le DBN réduit la dimensionnalité afin d'atténuer le problème du trop petit nombre d'échantillons pour la classe minoritaire.

La deuxième étape est la réduction de dimensionnalité DBN, qui vise à représenter les données originales de grande dimension comme des données optimales de basse dimension. Le modèle de réduction de dimensionnalité DBN que nous utilisons adopte une structure classique, qui maximise la rétention des fonctionnalités principales tout en réduisant autant que possible les dimensions des fonctionnalités. Le modèle entraîne entièrement chaque machine Boltzmann restreinte (RBM) grâce à une pré-formation, ajuste l'ensemble du DBN

Machine Translated by Google

tz
structure grâce à un réglage fin du poids, et apprend pleinement les caractéristiques de l' ensemble de données standardisé, qui est représenté comme un ensemble de données optimal de faible dimension. La troisième étape utilise le système d'apprentissage par égalisation large (BELS) pour classer les données optimales de faible dimension. Le modèle BELS égalise l'apprentissage du modèle des échantillons de classe minoritaire en ajustant les facteurs de gradient positifs et négatifs et en augmentant ses poids pour améliorer la classe de détection et de reconnaissance des échantillons de classe minoritaire.

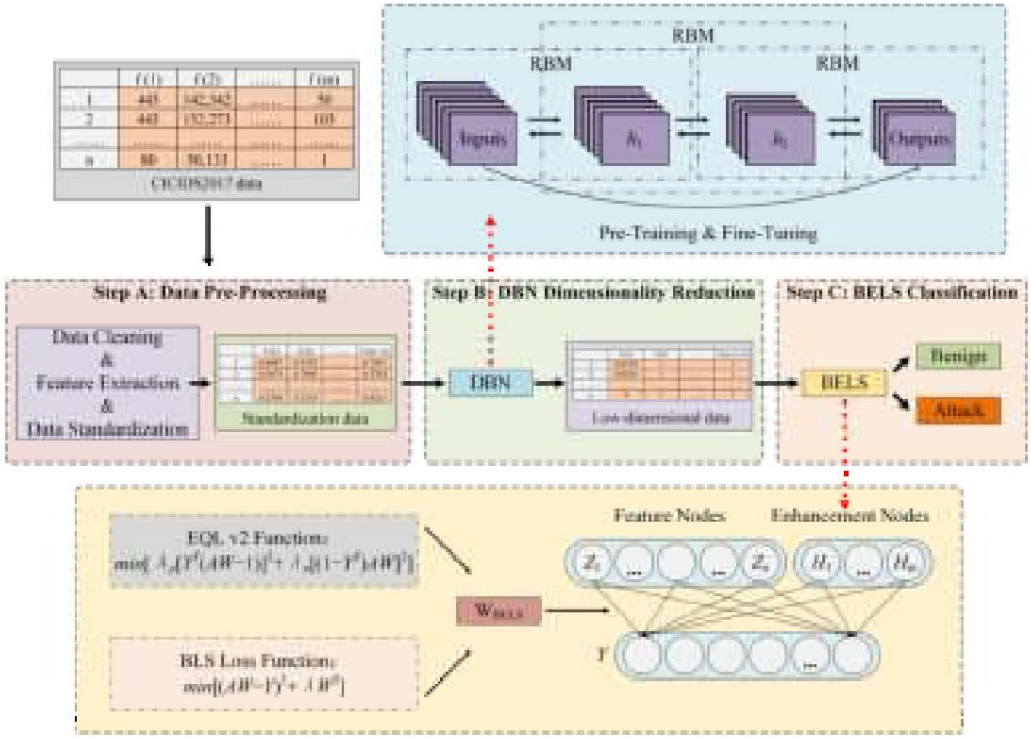


Figure 1. La structure de DBELS.

3.2. Réseau de croyance
profonde 3.2.1. Machine Boltzmann restreinte
t2
La machine restreinte de Boltzmann [24] est la structure de base du DBN, qui est un réseau neuronal peu profond et consiste en une structure à deux couches de couches visibles et cachées.
Les connexions dans un RBM ne sont pas dirigées et il n'y a aucune connexion entre les neurones de la même couche ; sa structure est visible dans la figure 2. Les RBM couramment utilisés sont généralement binaires. Qu'ils soient dans la couche cachée ou dans la couche visible, leur neurone prend la valeur de 0 ou 1 uniquement. Le principe de fonctionnement d'un RBM est basé sur la fonction énergétique, et les fonctions énergétiques de la couche visible et de la couche cachée sont données par , E(v, h) = −∑ bivi − ∑

$$cjhj - \sum vihjwij \quad (1)$$

où i appartient à la couche visible et j appartient à la couche cachée, b et c sont des biais du modèle, w est le poids du modèle, la première partie représente la contribution des nœuds de la couche visible à l'énergie du système, la la deuxième partie représente la contribution des nœuds de la couche cachée à l'énergie du système, et la dernière partie représente la contribution de l'énergie du système due à l'interaction entre la couche visible et la couche cachée.

Machine Translated by Google

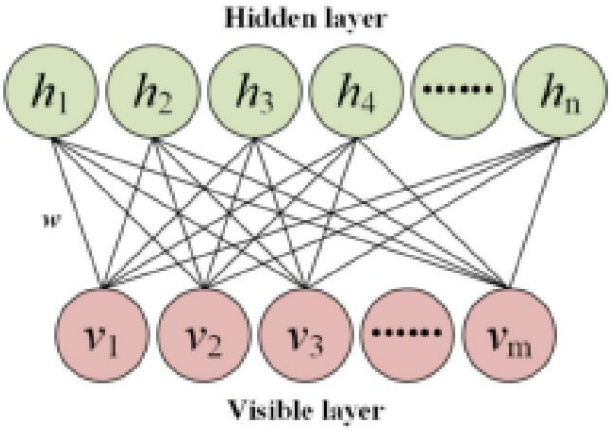


Figure 2. La structure de RBM.

Le RBM définit la densité de probabilité conjointe des couches visibles et cachées en termes de fonction énergétique. La probabilité conjointe de la couche visible et de la couche cachée est donnée par

$$p(v, h) = \frac{1}{Z} e^{-E(v,h)} \quad (2)$$

où Z est la fonction de partition, qui est utilisée pour normaliser la distribution de probabilité et garantir que la somme des distributions de probabilité est égale à 1 :

$$Z = \sum_{v,h} e^{-E(v,h)} \quad (3)$$

Avec la densité de probabilité conjointe des couches visibles et cachées, additionnée sur h donne la distribution de densité marginale de la couche visible :

$$(v) = \frac{1}{Z} \sum_{h} e^{-E(v,h)} \quad (4)$$

Pendant le processus de formation du modèle RBM, la variable de couche cachée h1 est échantillonnée et calculée à l'aide de la probabilité postérieure p(h1|v), et la nouvelle variable de couche visible v1 est échantillonnée par la probabilité postérieure p(v1|h1) ; ensuite, la nouvelle variable de couche cachée h2 est à nouveau échantillonnée de manière répétitive pour obtenir la couche visible v2. Les étapes ci-dessus sont répétées plusieurs fois jusqu'à ce que les paramètres convergent ou atteignent le nombre prédéfini d'itérations, que la distribution de probabilité conjointe soit proche de la distribution lisse et que la formation RBM soit terminée.

3.2.2. Formation du Deep Belief Network

Le réseau de croyances profondes [24] est un réseau neuronal profond empilé par plusieurs RBM. La structure DBN est illustrée à la figure 3. Au cours du processus de formation, le DBN utilise d'abord un algorithme de formation glouton couche par couche non supervisé pour chaque couche du RBM, à l'exception de la première et de la dernière couches de la structure DBN, où chaque couche de la couche cachée du RBM sert de couche visible de la couche suivante du RBM, pour transférer les informations sur les fonctionnalités et les informations d'apprentissage (cette phase est également appelée phase de pré-entraînement du DBN). Une fois la pré-formation terminée, une petite quantité de données étiquetées est attachée à la dernière couche du modèle DBN et une formation supervisée est effectuée sur chaque couche du RBM. L' algorithme de propagation vers l'arrière propage les informations d'erreur à chaque couche du RBM et utilise la fonction de vraisemblance maximale pour la fonction objectif, ce qui peut optimiser l'ensemble du DBN, obtenant ainsi la représentation optimale de faible dimension des données d'origine.

Machine Translated by Google

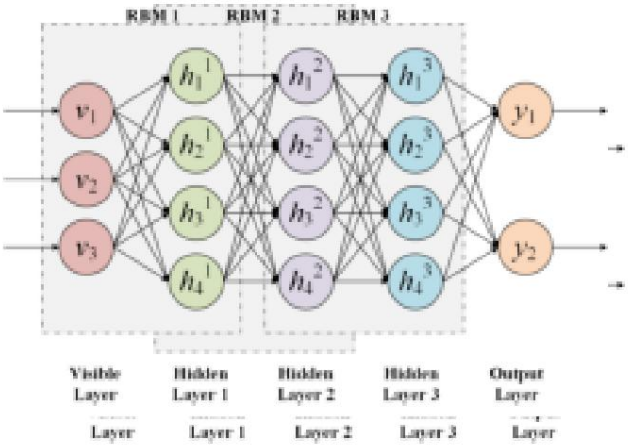


Figure 3. La structure du DBN.

3.3. Système d'apprentissage étendu

Le support d'un système d'apprentissage large [10] est un système neuronal lié à une fonction vectorielle aléatoire. réseau. Par rapport à la méthode d'apprentissage profond, le BLS ne comporte que deux couches de neurones réseau, et sa structure se présente sous la forme d'une extension de largeur. Sa structure de modèle est affichée dans la figure 4. Premièrement, le BLS mappe les données d'entrée dans une matrice de nœuds de fonctionnalités via le fonction de cartographie. Deuxièmement, la matrice de nœuds de fonctionnalités forme une matrice de nœuds d'amélioration en en utilisant la fonction d'amélioration. Ensuite, les nœuds de mappage de fonctionnalités et l'amélioration les nœuds sont utilisés ensemble comme entrée de la couche cachée. Enfin, le pseudo-inverse L'opération est utilisée pour calculer la matrice de poids entre la couche cachée et la sortie couche pour atteindre l'objectif de formation du modèle BLS.

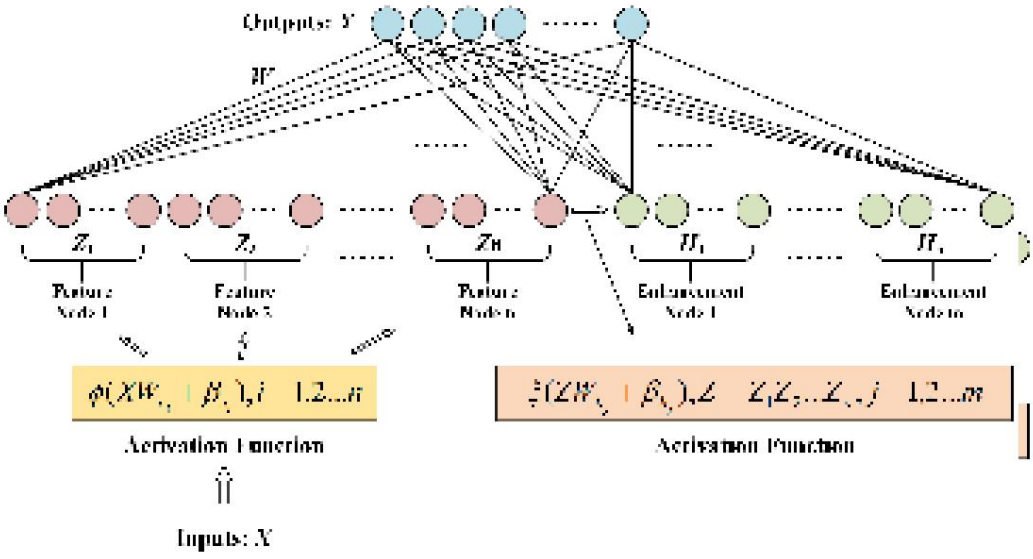


Figure 4. La structure du BLS.

Supposons que les données d'entrée X = [x1, x2, . . . , xn] appartiennent à R(N M) et la sortie matrice, Y = [y1, y2, . . . , yn], appartient à R(N C), où N est l'échantillon de données total, M est la dimension de l'échantillon, C est le nombre de catégories de l'échantillon de données, Z1, Z2, . . . , Zn fonctionnalités, H1, H2, . . . , Hn est la matrice des nœuds d'amélioration et W est la matrice de poids de sortie entre la couche cachée et la couche de sortie.

La procédure spécifique du BLS est la suivante. Tout d'abord, les exemples de données X sont mappés par groupe i caractéristiques pour obtenir la matrice de nœuds de caractéristiques du groupe i Zi , où i

$$Z_i = \phi_i(XW_{ei} + \beta_{ei}) \quad R^{N\times q}\ i = 1, 2, \ldots, n \tag{5}$$

Machine Translated by Google

où i est la fonction d'activation, q est le nombre de nœuds de fonctionnalités correspondant à chaque mappage de fonctionnalités, Wei est la matrice de poids du ième mappage de fonctionnalités et βei est la matrice de biais du ième mappage de fonctionnalités. Wei et βei sont générés aléatoirement . Ensuite, toutes les matrices de nœuds de fonctionnalités sont intégrées pour obtenir la matrice totale de nœuds de fonctionnalités :

$$Z^{n} = [Z1, Z2, \cdots, Zn] \quad R^{N\times nq} \tag{6}$$

Deuxièmement, la matrice de nœuds de caractéristiques totale Zn subit un mappage d'amélioration du groupe j pour obtenir la matrice de nœuds d'amélioration du groupe j Hj , où j (1, 2, . . . , m), est la suivante :

$$Hj = \xi j\, Z\, iWhj + \beta hj \quad R^{N\times r} \qquad j = 1, 2, \cdots, m \tag{7}$$

où ξj est la fonction d'activation, r représente le nombre de nœuds d'amélioration correspondant à chaque groupe de transformations d'amélioration, Whj est la matrice de poids de cartographie d'amélioration du groupe j , et βhj est la matrice de biais de cartographie d'amélioration du groupe j . La matrice totale des nœuds d'amélioration est obtenue en intégrant toutes les matrices de nœuds d'amélioration :

$$H^{m} = [H1, H2, \cdots, Hm] \quad R^{N\times mr} \tag{8}$$

Ensuite, les nœuds de mappage de fonctionnalités sont fusionnés avec les nœuds d'amélioration en tant qu'entrées du BLS, définies comme A :

$$UNE = [Z^{n} | H\ m] \quad R^{N\times(nq+mr)} \tag{9}$$

Enfin, la valeur prédite de l'algorithme d'apprentissage large peut être donnée comme suit :

$$\hat{Y} = [Z\ n\ |H\ m]W = AW \tag{dix}$$

où W est la matrice de pondération des nœuds de fonctionnalités et des nœuds d'amélioration de la couche de sortie.

Pour minimiser l'erreur entre la valeur prédite Yˆ et la valeur réelle Y et pour trouver un W approprié , le modèle BLS est optimisé avec la fonction suivante :

$$\arg\min_{W} FBLS = \left\| Y - \hat{Y} \right\|_{2}^{2} + \lambda \left\| W \right\|_{2}^{2} = \left\| Oui - AW \right\|_{2}^{2} + \lambda \left\| Wm \right\|_{2}^{2} \tag{11}$$

où le premier terme est utilisé pour contrôler la minimisation de l'erreur d'entraînement, le deuxième terme est utilisé pour empêcher le surajustement du modèle, et la valeur λ désigne les contraintes supplémentaires sur la somme des carrés des poids ; nous prenons la dérivée de la fonction ci-dessus et lui laissons prendre la valeur zéro, obtenant W comme

$$W = (A\ TA + \lambda I)^{-1} UN\ TY \tag{12}$$

où A est la matrice de mappage et d'amélioration, λ est un facteur de pénalité, I est une matrice d'identité et Y est la véritable étiquette.

3.4. Perte d'égalisation v2

L'idée de base de la perte d'égalisation v2 [21] est d'égaliser le degré d'apprentissage du modèle pour différentes classes d'échantillons en pondérant les gradients positifs et négatifs de chaque classificateur en fonction des rapports de gradient cumulés des gradients positifs et négatifs. du classificateur, respectivement. Pour résoudre le problème des ensembles de données déséquilibrés, une stratégie classique est la stratégie focale, et Eqlv2 est amélioré sur cette base. Cependant, EQL v2 offre des avantages distincts par rapport à la perte focale, notamment dans la gestion du déséquilibre des classes sans introduire de biais en faveur des classes minoritaires. Contrairement à la perte focale, qui ajuste la contribution de la perte en fonction de la difficulté de prédiction, EQL v2 équilibre dynamiquement les gradients pendant l'entraînement, réduisant ainsi le surapprentissage sur les catégories rares tout en restant concentré sur les classes communes. Cette approche améliore la stabilité et les performances du modèle sur des ensembles de données variés,

Machine Translated by Google

apporter une réponse plus nuancée aux problèmes de déséquilibre. Les gradients positifs et négatifs pour la sortie Z de chaque classificateur concernant la perte L sont

$$\frac{pos}{zj}(L) = \frac{1}{|Je|}\sum_{y\,j\,je}^{je}{}_{l}(p_j^{*} - 1) \tag{13}$$

$$\frac{négatif}{zj}(L) = \frac{1}{|Je|}\sum_{je}^{je}(1 - y_j^{*})p_j^{*} \tag{14}$$

où I est le nombre total d'échantillons, p_j^{*} est la probabilité que le ième échantillon soit prédit être de classe j, et y_j^{*} est la valeur de la matrice d'étiquetage véridique One-Hot dans laquelle le ième l'échantillon y j est de classe j.

Les poids EQL v2 sont mis à jour en définissant d'abord gj comme le rapport du gradient positif cumulé au gradient négatif de la tâche j jusqu'à l'itération t. Dans cette itération, les poids du gradient positif qt et du gradient négatif rt peuvent être calculés comme suit :

$$(t)\,(t) = 1 + \alpha\,1 - f(g)\,q\,jj \tag{15}$$

$$r_j^{(t)} = f(g\,j^{t}) \tag{16}$$

où f est une fonction de cartographie comme

$$f(x) = \frac{1}{-\gamma(x-\mu)\,1 + e} \tag{17}$$

Le gradient positif q et le gradient négatif r sont obtenus puis ils sont appliqués respectivement aux $(t)\,(t)$ jj gradients positifs et négatifs du lot en cours, et le gradient repondéré est

$$\frac{pos'}{zj}(L\,(t)\,) = q_j^{(t)}\,\frac{pos}{zj}(L\,(t)\,) \tag{18}$$

$$zj^{\,négatif}(L\,(t)\,) = r_j^{(t)}\,\frac{négatif}{zj}(L\,(t)\,) \tag{19}$$

Enfin, le rapport g j de $^{t+1}$ du gradient positif accumulé au gradient négatif de l'itération t + 1 mise à jour est calculé et noté

$$1gj^{\,t+} = \frac{\sum_{t=0}^{T}\frac{pos'}{zj}(L\,(t)\,)}{T\sum t=0\;\frac{nég'}{zj}(L(t)\,)} \tag{20}$$

EQL v2 choisit la statistique de gradient pour mesurer si une tâche est dans un état d'entraînement équilibré, en équilibrant le modèle en fonction de la facilité ou de la difficulté de l'entraînement de chaque classification pour le modèle, plutôt que de simplement considérer le nombre de ses échantillons positifs et négatifs. . L'introduction de l'idée de pondération guidée par gradient dans DBN et BLS aide le modèle à être formé avec plus d'attention aux caractéristiques des classes minoritaires d'échantillons, rendant ainsi le modèle plus complet et équilibré dans l'évaluation de chaque classe d'échantillons.
Le modèle ajuste la contribution de poids optimale de l'itération en fonction de l'impact des différentes catégories d'échantillons sur les performances de la classification.

3.5. Large système d'apprentissage par péréquation

Le W du système d'apprentissage par péréquation large est résolu comme suit : basé sur Dégradés positifs et négatifs EQL v2, les exemples de gradients positifs et négatifs peuvent être donnés comme suit :

$$p(W) = Oui^{\,T}(AW - 1) \tag{21}$$

$$n(W) = (1 - Oui^{\,T})AW \tag{22}$$

Machine Translated by Google

où A est la matrice de caractéristiques des nœuds mappés et d'amélioration, Y est la véritable étiquette et W est la matrice de poids.

La fonction de gradient peut être construite à partir des gradients positifs et négatifs comme

$$G(W) = \lambda p[Y^{T}(AW - 1)]2 + \lambda n[(1 - Oui^{T})AW]^{2} \quad (23)$$

où λp est le facteur de gradient positif et λn est le facteur de gradient négatif. Plus G(W) est petit, plus la probabilité d'échantillons positifs est grande et plus la probabilité d' échantillons négatifs est faible. L'ajustement des paramètres λp et λn permet d'ajuster l'effet d'apprentissage du modèle sur différents échantillons pour obtenir une égalisation du degré de contribution de chaque classe d'échantillons à la classification d'apprentissage du modèle.

Basé sur la fonction de perte BLS,

$$L(W) = (AW - Y)^{2} + \lambda W2 \quad (24)$$

où λ est le facteur de pénalité ; alors, l'objectif d'optimisation du BELS est la fonction de gradient EQL v2 et la fonction de perte BLS :

$$\text{argmin} : F(W) = (AW - Y)^{2} + \lambda W2 + \lambda p[Y^{T}(AW - 1)]2 + \lambda n[(1 - Oui^{T})AW]^{2} \quad (25)$$

Parmi eux, la première partie est la fonction de perte, qui est utilisée pour contrôler l' erreur de classification du modèle. La deuxième partie est le terme de pénalité, qui empêche principalement le modèle de surajuster. La troisième partie est le terme de gradient, qui est utilisé pour équilibrer le degré d'apprentissage des différents échantillons et atténuer les mauvaises performances du modèle dans la détection des échantillons de classes minoritaires. $\frac{\partial F(W)}{\partial W}$

Le F(W) existant s'exprime en prenant la dérivée partielle de W :

$$W = [\lambda pA\ TYYTA + \lambda nA^{T}(J1 - Oui)(J2 - Oui^{T})A + A\ TA + \lambda I]^{-1}(\lambda pA\ TYYT\ J3 + A\ TY) \quad (26)$$

où J est une matrice avec tous les éléments égaux à 1, λp est un facteur de gradient positif, λn est un facteur de gradient négatif, les facteurs de gradient positif et négatif sont utilisés pour contrôler le degré d'apprentissage du modèle sur différents échantillons et λ est un facteur de pénalité pour éviter le surajustement du modèle causé par un W trop grand.

4. Expériences

Cette section présente les expériences détaillées. Nous analysons en détail l'effet des hyperparamètres sur le modèle. Nous utilisons la recherche par grille pour fixer les facteurs de gradient positifs et négatifs dans des plages appropriées, en recherchant la combinaison de paramètres optimale qui maximise les performances de détection du modèle. Pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée, nous menons des expériences d'ablation complètes. Enfin, nous donnons une analyse comparative du modèle proposé avec d'autres méthodes de l'état de l'art.

4.1. Ensembles de données CICIDS2017

L'ensemble de données CICIDS2017 [25] proposé par l'Institut canadien pour la cybersécurité est l'un des ensembles de données de référence importants pour évaluer les modèles de détection d'intrusion. Les auteurs ont utilisé le système de profil de comportement pour analyser le comportement abstrait des interactions humaines sur la base de différents protocoles, en construisant 25 comportements abstraits des utilisateurs et en générant un trafic de fond naturel et convivial. L'ensemble de données contient des attaques bénignes et nouvelles courantes et comprend sept types d'attaques réseau, à savoir les attaques par déni de service , les attaques par force brute du shell sécurisé, les attaques de botnet, les attaques par déni de service distribué, les attaques d'applications Web, les exploits Heartbleed et la pénétration. tester les attaques. La distribution de l'échantillon et les caractéristiques de l'ensemble de données sont présentées dans le tableau 1.

Machine Translated by Google

Tableau 1. Répartition des classes de l'ensemble de données CICIDS2017.

Catégorie	Étiquette	Échantillon	Fonctionnalité
Bénin	Bénin	2 273 097	Port de destination, durée du flux, Tot Fwd|Bwd Pkts, Tot Len Av|Bwd Pkts, Fwd|Bwd Pkt Len Max|Min|Moyenne|Std, Min|Max Len Pkt, Pkt Len Moyenne|Std|Var, Taille moyenne du paquet, Moy Fwd|Bwd Seg Taille, débit octets|Pkts, Fwd|Bwd Pkts, Fwd|Bwd Débit de masse moyen, Fwd|Bwd Moy Octets|Pkts, Flow IAT Moyenne|Std|Max|Min, Av|Bwd IAT Total|Moyenne|Std|Max|Min, rapport descendant, Actif|Inactif Moyenne|Std|Max|Min, Fwd|Bwd PSH Drapeaux, Fwd|Bwd Drapeaux URG, Init Win Octets Fwd|Bwd, Fwd|Bwd En-tête Len, Act Data Pkt Avance, FIN|SYN|RST|PSH|ACK|URG|CWE|ECE Indicateurs, taille minimale de segment avant, sous-flux avant|arrière Paquets|Octets, étiquette
DoS/DDoS	DoS Hulk, DDoS, DoS GoldenEye, DoS Slowloris, Test DoS Slowhttp, Saignement de cœur	380 699	
PortScan	PortScan	158 930	
Force brute	FTP-Patator, SSH-Patator	13 835	
Attaque Web	Attaque Web : force brute, Attaque Web – XSS, Attaque Web : injection SQL	2180	
Réseau de robots	Bot	1966	
Total	-	2 830 707	79

4.2. Détails d'implémentation

Les paramètres du modèle DBELS ont été définis comme dans le tableau 2, y compris les paramètres de formation du modèle de réduction de dimensionnalité DBN, la fonction d'activation BELS, le nombre de nœuds dans chacun des groupes de mappage, le nombre de nœuds dans chacune des améliorations groupes, et le coefficient de pénalité, λ. Le modèle de réduction de dimensionnalité DBN consistait en une pile de trois RBM, (49,64), (64,32) et (32,16). Toutes les expériences ont été réalisées en utilisant un processeur Intel(R) Core (TM) i7-11700 64 bits avec 32 Go de RAM dans l'environnement Windows 11. Les modèles ont été implémentés dans Python v3.9.16 à l'aide de la bibliothèque PyTorch v2.1.0.

Tableau 2. Les paramètres de DBELS.

Paramètre	Pré-formation	Réglage fin	Description
Époques	30	100	-
Taux d'apprentissage	0,0001	0,00001	-
Taille du lot	64	128	-
Optimiseur	SGD	Adam	-
Étape de Gibbs	-	-	5
Mappage|Nombre de nœuds du groupe d'amélioration	-	-	16
Cartographie|Fonction d'activation d'amélioration	-	-	Rélu
λ	-	-	0,001

4.3. Indicateurs de performance

Les mesures d'évaluation pour la détection d'intrusion comprennent principalement la précision, le rappel et taux de faux positifs (FPR). Dans la formule, le vrai positif (TP) représente le nombre de échantillons correctement identifiés comme positifs, le vrai négatif (TN) est le nombre d'échantillons correctement identifié comme négatif, le faux positif (FP) est le nombre d'échantillons négatifs incorrectement identifié comme positif, et le faux négatif (FN) est le nombre de positifs échantillons identifiés à tort comme négatifs. La précision désigne le rapport du nombre de échantillons correctement classés par le modèle au nombre total d'échantillons :

$$\text{Précision} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (27)$$

Machine Translated by Google

Le rappel indique la proportion de cas positifs dans l'échantillon qui sont correctement prédit, également appelé taux de détection :

$$\text{Rappel} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{28}$$

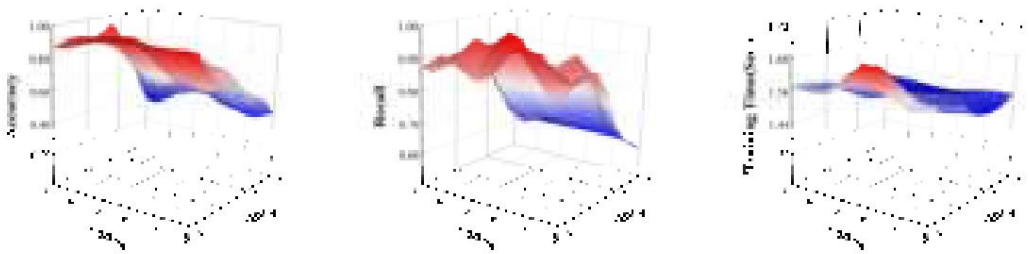
Le taux de faux positifs est la proportion d'échantillons véritablement négatifs que le modèle classe à tort comme positif :

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{29}$$

4.4. Analyse des hyperparamètres

4.4.1. Effet de λp et λn sur la classification binaire

Pour les deux paramètres λp et λn du modèle DBELS, leurs effets sur la performance du modèle dans différentes tâches de classification ont été explorées. Leurs effets sur la performance de précision, de rappel et de temps dans la tâche de classification binaire sont illustrés à la figure 5. Pour précision et rappel, les performances ont tendance à augmenter avec la diminution de λp et λn. Différent Les combinaisons de paramètres conduisent à des différences plus importantes car le modèle est plus sensible aux deux paramètres dans la tâche de classification binaire, et à mesure que l'ordre de grandeur s'améliore, les performances du modèle changent radicalement. Les expériences montrent que lorsque λp est autour de 10^{-5} ordres de grandeur et λn est d'environ 10^{-4} ordres de grandeur, le modèle peut maintenir une précision et un rappel plus élevés, à environ 0,99 et 0,98, respectivement. Pour le temps de formation du modèle avec le changement de λp et λn, le temps de formation fluctue légèrement au-dessus et en dessous de 1,6 s, indiquant que le temps de formation du modèle dans la classification binaire la tâche n'est pas sensible aux facteurs positifs et négatifs.



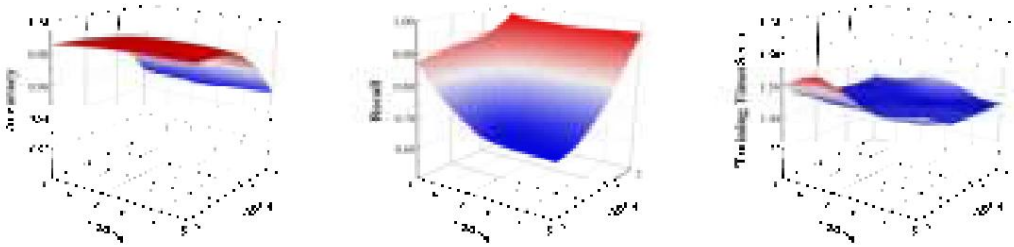
(un) (b) (c)

Figure 5. L'effet de λp et λn sur la classification binaire. Les effets sur la performance : (a) le effet sur la précision ; (b) l'effet sur le rappel ; (c) l'effet sur le temps de formation.

et suiv . 4.4.2. Effet de λp et λn sur la multi-classification

Dans la tâche multi-classification, son effet sur la précision, le rappel et la performance temporelle sont illustrés à la figure 6. Pour des raisons de précision, le modèle est presque insensible à λn et tend presque être stable lorsque λn change ; quand $10^{-3} < \lambda p < 10^{-2}$, la précision augmente à mesure que λp augmente. Pour le rappel, à mesure que λp et λn augmentent, le rappel du modèle a tendance à augmenter. Lorsque le λp l'ordre de grandeur de la valeur est 10^{-2} et l' ordre de grandeur de la valeur λn est d'environ 10^{-3}, le rappel atteint un maximum d'environ 0,95. Pour le temps de formation du modèle avec le changement de λp et λn, le temps du modèle fluctue de 1,4 s à 1,6 s et se stabilise presque, ce qui montre que le temps d'entraînement n'est pas sensible aux paramètres des facteurs positifs et négatifs. Pour obtenir une meilleure performance globale, l'ordre de grandeur de λp est d'environ 10^{-4}, et l'ordre de grandeur de λn est d'environ 10^{-3}, ce qui peut stabiliser la précision à 0,96 et le rappel se stabilise à 0,95.

Machine Translated by Google

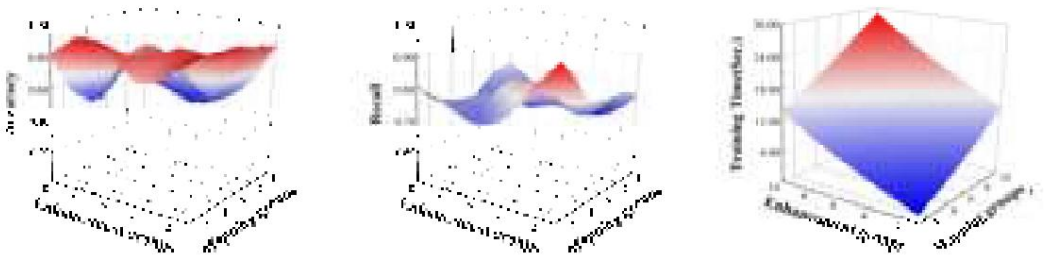


(un) (b) (c)

Figure 6. L'effet de λp et λn sur la multi-classification. Les effets sur la performance : (a) l'effet sur l'exactitude; (b) l'effet sur le rappel ; (c) l'effet sur le temps de formation.

4.4.3. Effet du mappage et des groupes d'amélioration sur la classification binaire

Les expériences ont exploré les effets des groupes d'amélioration du modèle DBELS et cartographier les groupes sur les performances du modèle pour différentes tâches de classification. Pour la tâche de classification binaire, les effets des groupes d'amélioration et des groupes de mappage sur la précision, le rappel et le temps de formation sont illustrés à la figure 7. Pour plus de précision et de rappel, le modèle flotte davantage avec le changement de paramètres car le modèle de tâche de classification binaire est plus sensible à ces deux paramètres. Avec l'augmentation de la matrice de cartographie Z et du matrice d'amélioration H, sa matrice d'entrée A augmente et les performances de détection du modèle dépend fortement de la matrice A. Pour le temps de formation, il augmente avec l'augmentation de groupes d'amélioration et groupes de mappage, car la matrice d'entrée A augmente avec la augmentation des paramètres. D'après les résultats expérimentaux, on sait que lors de l'amélioration les groupes et les groupes de cartographie sont sélectionnés comme 1, cela peut garantir à la fois moins de temps de formation et une précision et un rappel plus élevés.



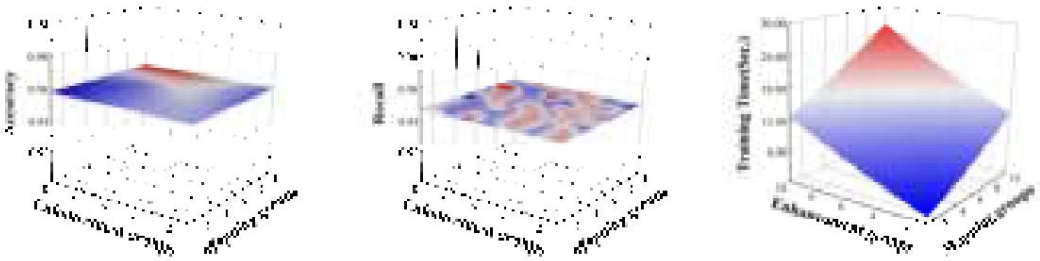
(un) (b) (c)

Figure 7. L'effet des groupes d'amélioration et des groupes de mappage sur la classification binaire. Les effets sur les performances : (a) l'effet sur la précision ; (b) l'effet sur le rappel ; (c) l'effet sur le temps de formation.

4.4.4. Effet du mappage et des groupes d'amélioration sur la multi-classification

Pour la tâche multi-classification, les effets sur l'exactitude et le rappel sont présentés dans la figure 8. Avec l'augmentation des groupes d'amélioration et des groupes de cartographie, la précision et le rappel tendent presque à se stabiliser, ce qui indique que pour la tâche multi-classification, ces deux métriques de le modèle DBELS n'est pas sensible aux groupes de mappage et d'amélioration. La formation time montre une tendance à la hausse de la consommation de temps, à la fois avec l'augmentation de la cartographie groupes et groupes d'amélioration. La raison en est que l'augmentation du nombre de groupes de cartographie et Les groupes d'amélioration augmentent la taille de la matrice de mappage Z et l'amélioration matrice H, entraînant une augmentation de la matrice A, augmentant la charge et la consommation du modèle. On peut conclure que depuis l'augmentation des groupes d'amélioration et Les groupes de mappage ont moins d'impact sur les performances de détection du modèle et augmentent la consommation de temps lorsque les groupes d'amélioration et les groupes de mappage sont sélectionnés comme 1, la précision et le rappel maintiennent des performances et une consommation de temps plus élevées est minimisée.

Machine Translated by Google



(un) (b) (c)

Figure 8. L'effet des groupes d'amélioration et des groupes de mappage sur la multi-classification. Les effets sur les performances : (a) l'effet sur la précision ; (b) l'effet sur le rappel ; (c) l'effet sur le temps de formation.

4.5. Études sur l'ablation

Pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée, nous avons réalisé des expériences d'ablation basées sur des modèles de réduction de dimensionnalité tridimensionnelle et deux modèles de classification. Les modèles de réduction de dimensionnalité tridimensionnelle sont l'ACP traditionnelle, la DBN traditionnelle et DeBN avec l'introduction d'EQL v2. Les méthodes de classification sont le BLS traditionnel et notre BELS amélioré, respectivement. Nous avons évalué les performances de détection d'un total de huit méthodes sous une tâche de classification binaire et une tâche de multi-classification basée sur le Ensemble de données CICIDS2017. Toutes les expériences ont été réalisées dans le même environnement avec des traitements de données identiques, et les performances de détection des différents modèles sont indiqué dans les tableaux 3 et 4. Le taux de reconnaissance de chaque échantillon sous différentes classifications Les tâches sont présentées dans les tableaux 5 et 6.

Tableau 3. Les performances des différentes méthodes sur la classification binaire.

Méthode	Algorithme					Métrique d'évaluation		
	BLS	BELS	APC	DBN	DeBN	Précision	Rappel	Fois)
BLS						0,88105	0,63062	1.83126
PBLS						0,86780	0,59044	0,75575
DBLS						0,91531	0,73711	0,60949
DeBLS						0,29939	0,58103	0,60531
BELS						0,96670	0,92483	4.86849
PBELS						0,92279	0,85250	1,64884
DBELS						0,99240	0,98579	1.63914
DeBELS						0,98896	0,97516	1,57186

Le dans le tableau indique que la méthode contient l'algorithme.

Tableau 4. Performances des différentes méthodes en multi-classification.

Méthode	Algorithme					Métrique d'évaluation		
	BLS	BELS	APC	DBN	DeBN	Précision	Rappel	Fois)
BLS						0,97450	0,47382	1.74388
PBLS						0,93755	0,29756	0,51006
DBLS						0,99286	0,65797	0,51341
DeBLS						0,98936	0,67712	0,50913
BELS						0,97060	0,52527	5.00825
PBELS						0,93848	0,47024	1,77999
DBELS						0,98719	0,80346	1.49983
DeBELS						0,95790	0,94741	1.63619

Le dans le tableau indique que la méthode contient l'algorithme.

Machine Translated by Google

Tableau 5. Le rappel de chaque échantillon sur la classification binaire.

Catégorie	Méthode							
	BLS	PBLS	DBLS	DeBLS	BELS	PBELS	DBELS	DeBELS
Bénin	0,99983	0,99934	0,99983	0,16582	0,98655	0,95613	0,99554	0,99551
Attaque	0,26141	0,18154	0,47439	0,99625	0,86312	0,74888	0,97604	0,95480

Tableau 6. Le rappel de chaque échantillon sur multi-classification.

Catégorie	Méthode							
	BLS	PBLS	DBLS	DeBLS	BELS	PBELS	DBELS	DeBELS
Bénin	0,99094	0,99252	0,99787	0,99665	0,99057	0,95042	0,98886	0,95903
Réseau de robots ARE	0	0	0	0,13660	0	0	0	0,94845
Force brute	0	0	0,98480	0,98655	1	0	0,99766	0,98830
DoS/DDoS	0,91515	0,79286	0,97416	0,95507	0,87920	0,89234	0,98244	0,94544
Analyse des ports	0,93683	0	0,99101	0,98787	0,85313	0,97871	0,99093	0,98709
Attaque Web	0	0	0	0	0	0	0,86085	0,85613

4.5.1. Analyse des performances sur la classification binaire

Dans la tâche de classification binaire, la structure BLS traditionnelle est moins efficace pour reconnaître l'ensemble de données CICIDS2017, principalement en raison des informations redondantes de grande dimension. dans l'ensemble de données qui affecte les performances de classification, ce qui entraîne une précision et une diminution rappelons-le, en particulier le manque d'attention accordé aux échantillons des classes minoritaires dans les pays déséquilibrés. base de données. Après l'introduction d'EQL v2, la précision et le rappel du modèle BELS se sont considérablement améliorés, indiquant qu'EQL v2 améliore la capacité à reconnaître les classes minoritaires. échantillons pour traiter le problème de déséquilibre. Le modèle DBLS (Deep Believe Network Broad Learning System) réduit la redondance des données grâce à la dimensionnalité DBN. réduction, ce qui améliore la précision et le rappel, qui ont été améliorés de 0,034 et 0,106, respectivement. Le modèle DeBLS se concentre trop sur les échantillons des classes minoritaires pendant Réduction de la dimensionnalité du DeBN, entraînant une diminution des performances de détection pour échantillons de la classe majoritaire.

DBELS a les performances de détection les plus élevées dans la tâche de classification binaire, et l'introduction d'EQL v2 au-dessus du DBLS améliore la précision et le rappel en 0,077 et 0,249, respectivement, indiquant que la combinaison de la dimensionnalité DBN La réduction et EQL v2 améliorent considérablement les performances du modèle. Bien que le DeBELS Le modèle introduit EQL v2 à l' ensemble de données de réduction de dimensionnalité DeBN et améliore les performances du modèle en ajustant les paramètres de gradient positif et négatif facteurs, la précision et le rappel ont légèrement diminué de 0,004 et 0,01, respectivement, par rapport avec DBELS, qui reflète l'impact négatif du surapprentissage des échantillons anormaux sur performances de classement. Pour le système d'apprentissage général de l'analyse en composantes principales (PBLS), après la réduction de la dimensionnalité PCA, la précision et le rappel ont diminué de 0,014 et 0,040, respectivement, par rapport au BLS, principalement en raison de plus d'informations perte lors de la réduction de dimensionnalité de l'ACP et l'incapacité à gérer les déséquilibres des ensembles de données de manière efficace. L'analyse des composantes principales du vaste système d'apprentissage de la péréquation (PBELS) avait une précision de 0,923 et un rappel de 0,853, par rapport au PBLS, avec une amélioration de 0,055 et 0,262, indiquant qu'EQL v2 peut encore s'améliorer de manière significative les performances de détection des échantillons de classe minoritaire même lorsque la dimensionnalité PCA la réduction est inefficace. Cependant, le PBELS a réduit la précision et le rappel de 0,070 et 0,106, respectivement, par rapport à DBELS, démontrant en outre que la dimensionnalité du DBN La réduction surpasse la réduction de dimensionnalité PCA dans les tâches de classification binaire.

Machine Translated by Google

4.5.2. Analyse des performances sur la multi-classification

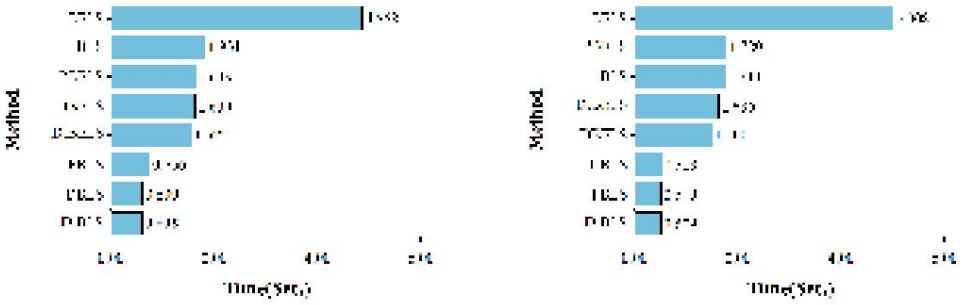
Dans la tâche multi-classification, le BLS traditionnel a donné de mauvais résultats, avec une précision de 0,975 et un rappel de seulement 0,474, principalement en raison du grave déséquilibre de l'ensemble de données qui affecte les performances de classification. Le modèle BELS après l'introduction d'EQL v2 avait un rappel amélioré de 0,051, principalement parce qu'EQL v2 améliore le problème de déséquilibre des données, ce qui permet au modèle d'augmenter le poids des échantillons d'attaque pour les classes minoritaires et améliore ainsi le taux de détection. Le modèle DBLS, après réduction de dimensionnalité par DBN, avait une précision améliorée de 0,018 et un rappel amélioré de 0,184, ce qui est attribué au fait que la réduction de dimensionnalité DBN réduit la redondance des données, atténue l' impact négatif des données brutes et améliore la performances de détection du modèle. Le modèle DeBLS a amélioré le rappel de 0,02 par rapport au DBLS, ce qui est attribué au fait que DeBN en apprend davantage sur les échantillons de classe minoritaire, élimine la redondance entre les différents échantillons et conserve en même temps les caractéristiques clés des échantillons de classe minoritaire. ce qui améliore les performances de classification et de détection. Le modèle DBELS s'est amélioré de 0,018 en termes de réduction de dimensionnalité DBN, et avec l'introduction d'EQL v2, la précision s'est améliorée de 0,017 et le rappel s'est amélioré de 0,278 ; par rapport au DBLS, le rappel s'est amélioré de 0,658 à 0,803, ce qui est attribué au fait qu'EQL v2 équilibre le poids d'apprentissage des échantillons de classe minoritaire et met davantage l'accent sur les échantillons de classe m

La précision du modèle DeBELS de 0,957 et le rappel de 0,947 étaient les meilleures performances dans la tâche de multi-classification, et le rappel a été considérablement amélioré de 0,27 par rapport à DeBLS, car le modèle BLS amélioré est mieux à même de gérer les déséquilibres. ensembles de données et améliore la capacité de reconnaître les attaques de classe minoritaire. Le rappel de DeBELS s'est amélioré de 0,144 par rapport à DBELS, et les performances globales de classification se sont améliorées de manière significative. La précision du modèle PBLS a diminué de 0,037 et le rappel de 0,176 après la réduction de la dimensionnalité de l'ACP, car la réduction de la dimensionnalité de l'ACP entraîne davantage de perte d'informations, ce qui affecte l' effet de multi-classification. La précision du modèle PBELS était de 0,938 et le rappel de 0,470 ; par rapport au PBLS, la précision et le rappel ont été améliorés respectivement de 0,001 et 0,173, ce qui indique que l'introduction d'EQL v2 améliore le taux de détection des échantillons appartenant à des classes minoritaires. Cependant, par rapport à DeBELS, la précision et le rappel de PBELS ont été réduits respectivement de 0,019 et 0,477, ce qui indique que la réduction de dimensionnalité DBN est bien meilleure que le modèle de réduction de dimensionnalité PCA en termes de performances de détection, et prouve une fois de plus la supériorité du modèle. modèle proposé dans les tâches multi-classificati

4.5.3. Analyse temps-coût

La comparaison des temps de formation pour les différents modèles est présentée dans la figure 9. Pour la classification binaire et la multi-classification, le temps de formation du BLS traditionnel était d'environ 1,8 s, reflétant l'avantage des réseaux peu profonds avec des coûts de temps inférieurs dans la classification des modèles. Le temps de formation de BELS était d'environ 5 s, et l'augmentation du temps était due au fait que l'introduction d'EQL v2 nécessite des performances supplémentaires d' opérations matricielles multiples. Le temps de formation du modèle DBLS était d'environ 0,5 s, ce qui représente une réduction significative par rapport au modèle BLS, ce qui indique que les données de grande dimension ont un effet négatif significatif sur le temps de formation du modèle et que la dimensionnalité réduite de l'ensemble de données réduit la temps de formation à 25% de celui d'origine. Le temps de formation de DeBLS était également d'environ 0, 5 s, ce qui indique que l'introduction d'EQL v2 après la réduction de dimensionnalité de DBN n'a pratiquement aucun effet sur le temps de formation. Le temps de formation pour DBELS était d'environ 1,5 s, ce qui est considérablement réduit par rapport à BELS, grâce à la réduction de dimensionnalité du modèle DBN pour les données de grande dimension. Cependant, il y a eu une augmentation par rapport au DBLS en raison de certains calculs supplémentaires requis par le modèle BELS amélioré. Le temps de formation de DeBELS était d'environ 1,6 s, ce qui est presque le même que celui de DBELS, ce qui indique que l'introduction de l'ensemble de données de faible dimension avec EQL v2 n'a pas d'impact significatif sur le temps de formation et qu'il y a une légère augmentation . en termes de temps en raison du petit nombre de calculs supplémentaires des matrices de gradient positif et négatif par rapport à DeBL

Machine Translated by Google



(un) (b)

Figure 9. Comparaison du temps de formation pour différentes méthodes : (a) classification binaire ; (b) multiclassification.

Les résultats montrent que les modèles hybrides basés sur DBN et BLS, DBELS et DeBELS, ont maintenu une faible consommation de temps par rapport aux modèles BLS traditionnels, bénéficiant des avantages des réseaux BLS peu profonds qui sont rapides en termes de calcul et faciles à former. Bien que le modèle de réduction de dimensionnalité PCA réduise également une partie du temps de formation, ses performances de détection sont fortement dégradées, confirmant une fois de plus les avantages du modèle de réduction de dimensionnalité basé sur DBN. Le modèle proposé est comparable au modèle d'apprentissage profond traditionnel, qui présente un avantage significatif en termes de consommation de temps , ce qui est propice à l'économie d'une certaine quantité de ressources de calcul dans les applications pratiques.

4.5.4. Analyse des résultats pour le rappel de chaque échantillon sur la classification binaire

Le taux de détection des échantillons bénins et d'attaque dans le cadre de la tâche de classification binaire est présenté dans le tableau 5. Le BLS traditionnel a obtenu de mauvais résultats dans la détection des échantillons d'attaque avec un rappel de seulement 0,261, ce qui est dû au surapprentissage des échantillons de la classe majoritaire lors du traitement. ensembles de données déséquilibrés, ce qui entraîne un faible taux de détection pour les échantillons des classes minoritaires. Avec l'introduction du modèle BELS avec EQL v2, le taux de détection d'attaque s'est considérablement amélioré pour atteindre 0,863, ce qui améliore considérablement l'identification des échantillons de classes minoritaires. Le modèle DBLS avec réduction de dimensionnalité DBN a amélioré le taux de détection d'attaque de 0,213, ce qui suggère que la réduction de dimensionnalité DBN réduit la redondance des données et a un impact positif sur la classification ultérieure du modèle. Dans le modèle DeBLS , le taux de détection d'attaque atteignait 0,996, mais le taux de détection de bénin n'était que de 0,165, ce qui montre que la réduction de la dimensionnalité de DeBN se concentre excessivement sur des classes minoritaires d'échantillons, entraînant une diminution des performances de reconnaissance du majorité des classes d'échantillons.

Le modèle DBELS, après réduction de dimensionnalité par l'introduction d'EQL v2, avait un taux de détection de 0,996 pour Bénin et de 0,976 pour Attaque, ce qui a amélioré le taux de détection des deux classes d'échantillons de 0,009 et 0,113, respectivement, par rapport au modèle BELS. . Étant donné que la réduction de la dimensionnalité du DBN réduit les fonctionnalités redondantes et améliore les performances de classification du modèle, par rapport au DBLS, DBELS a considérablement amélioré le taux de détection d'attaque de 0,474 à 0,955, ce qui est attribué au fait qu'EQL v2 équilibre les poids d'échantillon de sorte que le Le modèle se concentre sur chaque classe d'échantillons de manière plus équilibrée. Les taux de détection de bénin et d'attaque pour le modèle DeBELS étaient respectivement de 0,995 et 0,955, et par rapport à DeBLS, le taux de détection de bénin était considérablement plus élevé et le taux de détection d'attaque était légèrement inférieur, mais EQL v2 a amélioré les performances de détection en rendant le modèle plus équilibré en se concentrant sur chaque classe d'échantillons. Par rapport à DBELS, le taux de détection de bénin pour DeBELS est resté presque inchangé et le taux de détection d'attaque a légèrement diminué, ce qui est attribué au surapprentissage des échantillons de classes minoritaires apportés par DeBN, mais la classification a toujours bien fonctionné grâce à l'ajustement des résultats positifs. et des facteurs de gradient négatifs.

Machine Translated by Google

Le taux de détection d'attaque pour le modèle PBLS n'était que de 0,182 après la réduction de dimensionnalité PCA, ce qui représente une diminution par rapport à celui du modèle BLS de 0,080. La réduction de la dimensionnalité de l'ACP entraîne une perte d'informations, ce qui affecte négativement l' effet de détection de classification des échantillons de classes minoritaires. Le taux de détection des attaques du modèle PBELS était de 0,749, soit une amélioration de 0,567 par rapport au modèle PBLS. L'introduction d' EQL v2 permet au modèle de se concentrer sur chaque classe d'échantillons de manière plus équilibrée, ce qui améliore les performances de détection des échantillons de classes minoritaires. Malgré l'amélioration du modèle PBELS, son taux de détection d'attaque était toujours inférieur de 0,227 à celui de DBELS, ce qui prouve encore la supériorité du modèle de réduction de dimensionnalité DBN en termes de performances de détection.

4.5.5. Analyse des résultats pour le rappel de chaque échantillon sur multi-classification

Les taux de détection des différentes méthodes pour chaque type d'échantillon dans le cadre de la tâche de multi-classification sont présentés dans le tableau 6. Le BLS traditionnel n'a pas bien fonctionné lorsqu'il s'agissait de l'ensemble de données déséquilibré CICIDS2017, et bien qu'il ait eu de meilleures performances de détection pour un plus grand nombre d'échantillons. (par exemple, Benign, DoS/DDoS, Port Scan), il était médiocre dans la détection des échantillons de quelques classes (par exemple, Botnet ARES, Brute Force, Web Attack). En effet, le modèle BLS est incapable d'équilibrer les contributions des différentes classes d'échantillons lorsqu'il s'agit d'ensembles de données déséquilibrés, ce qui entraîne un taux de détection très faible pour les échantillons de classes minoritaires. L'introduction du modèle BELS avec EQL v2 a considérablement amélioré le taux de détection des attaques Brute Force, ce qui a amélioré l'identification des attaques.
Cependant, Botnet ARES et Web Attack étaient toujours indétectables car les caractéristiques de ces échantillons minoritaires sont très similaires à celles d'autres échantillons, que le modèle est incapable de différencier, ce qui conduit à des faux positifs. Le modèle DBLS élimine certaines redondances de données après réduction de dimensionnalité par DBN, ce qui améliore les performances de détection. Le taux de détection de Brute Force a été amélioré à 0,985, mais Botnet ARES et Web Attack n'ont toujours pas été détectés. Cela indique que la réduction de dimensionnalité ne peut à elle seule résoudre le problème des ensembles de données déséquilibrés, en particulier pour les classes comportant un très petit nombre d'échantillons.

Le modèle DeBLS a encore amélioré les performances de détection et la plupart des types d'attaques ont été détectés, y compris le Botnet ARES. En effet, la réduction de dimensionnalité DeBN en apprend davantage sur les échantillons de classe minoritaire et préserve leurs caractéristiques clés, mais l'attaque Web était toujours indétectable, ce qui nécessite de se concentrer davantage sur les échantillons de classe minoritaire . Le modèle DBELS a montré une amélioration significative du taux de détection de la plupart des types d'attaques par rapport à BELS et DBLS, en particulier Web Attack, de 0 à 0,856.
En effet, la réduction de la dimensionnalité DBN réduit la redondance des données, tandis qu'EQL v2 permet au modèle de mieux se concentrer sur les échantillons de classes minoritaires. Cependant, Botnet ARES n'a toujours pas été détecté, ce qui suggère que la réduction de la dimensionnalité du DBN n'est pas suffisante pour résoudre le problème. Le modèle DeBELS a maintenu un taux de détection élevé sur tous les types d'attaques. Par rapport à DeBELS, le taux de détection du Botnet ARES est passé de 0,137 à 0,948 et celui des attaques Web de 0 à 0,856. En effet, l'introduction d'EQL v2 améliore la capacité à mieux reconnaître et apprendre les échantillons de classe minoritaire, ce qui améliore considérablement le taux de détection. DeBELS a encore amélioré le taux de détection du Botnet ARES par rapport à DBELS, car la réduction de la dimensionnalité DeBN préserve les caractéristiques clés des échantillons de classe minoritaire avec une granularité plus fine et atténue le problème de déséquilibre des données.

Le modèle PBLS utilisant la réduction de dimensionnalité PCA n'a détecté que le plus grand nombre d'attaques DoS/DDoS, tandis que Port Scan, Botnet ARES, Brute Force, Web Attack et d'autres attaques n'ont pas été détectés. Par rapport au modèle BLS, Port Scan n'a pas pu être détecté en raison de la perte d'informations provoquée par la réduction de dimensionnalité du PCA, qui affecte l'effet de multi-classification. Après l'introduction d'EQL v2 dans le modèle PBELS, le taux de détection de Port Scan s'est amélioré à 0,978, mais les quelques autres classes d'attaques (par exemple, Botnet ARES, Brute Force et Web Attack) n'ont toujours pas été détectées. Cela suggère que la réduction de la dimensionnalité de la PCA entraîne la perte de fonctionnalités clés. Comparé à

Machine Translated by Google

DeBELS, les performances de détection de PBELS étaient pires, ce qui indique que la réduction de dimensionnalité basée sur DBN surpasse la réduction de dimensionnalité PCA traditionnelle en termes de performances de détection.

4.6. Analyse de ROC-AUC La

figure 10 montre les courbes des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) pour la classification binaire DBELS. La courbe ROC moyenne globale a une aire sous la courbe (AUC) de 0,9949, ce qui indique que le classificateur DBELS a obtenu d'excellents résultats sur l'ensemble de données et est proche d'être un classificateur parfait. Deuxièmement, on peut observer les courbes ROC pour les deux catégories (Attaque et Bénin), chacune avec une AUC de 0,9916, ce qui indique que le classificateur a également eu de hautes performances en considérant chaque catégorie individuellement, en particulier lorsqu'il s'agit d'un nombre minoritaire de des échantillons. L'AUC proche de 1 implique que le classificateur a un taux de vrais positifs (TPR) très élevé dans ses prédictions pour la catégorie tout en maintenant un FPR relativement faible. Cela signifie identifier autant d'échantillons vraiment positifs que possible tout en maintenant le taux d'erreurs de diagnostic aussi bas que possible. Dans l'ensemble, le classificateur DBELS présentait d'excellentes performances sur l'ensemble des données de déséquilibre, à la fois pour les échantillons de classe minoritaire et pour les échantillons de classe majoritaire.

tt

La courbe ROC de multi-classification DeBELS est présentée à la figure 11. La courbe ROC moyenne globale a une AUC de 0,9760, ce qui indique que le classificateur a bien fonctionné sur l' ensemble de l'ensemble de données. Les détections Benign, Botnet ARES, Brute Force, DoS/DDoS et Port Scan ont bien fonctionné ; leurs zones AUC étaient toutes supérieures à 0,9700, bien que Web Attack ait la zone AUC la plus basse de 0,9100, mais elle est déjà meilleure que les autres modèles du même niv Dans l'ensemble, après l'introduction des facteurs de gradient positifs et négatifs EQL v2, en ajustant les poids des paramètres, le modèle peut accorder plus d'attention aux classes minoritaires d' échantillons face à des ensembles de données déséquilibrés, améliorant ainsi les performances de détection.

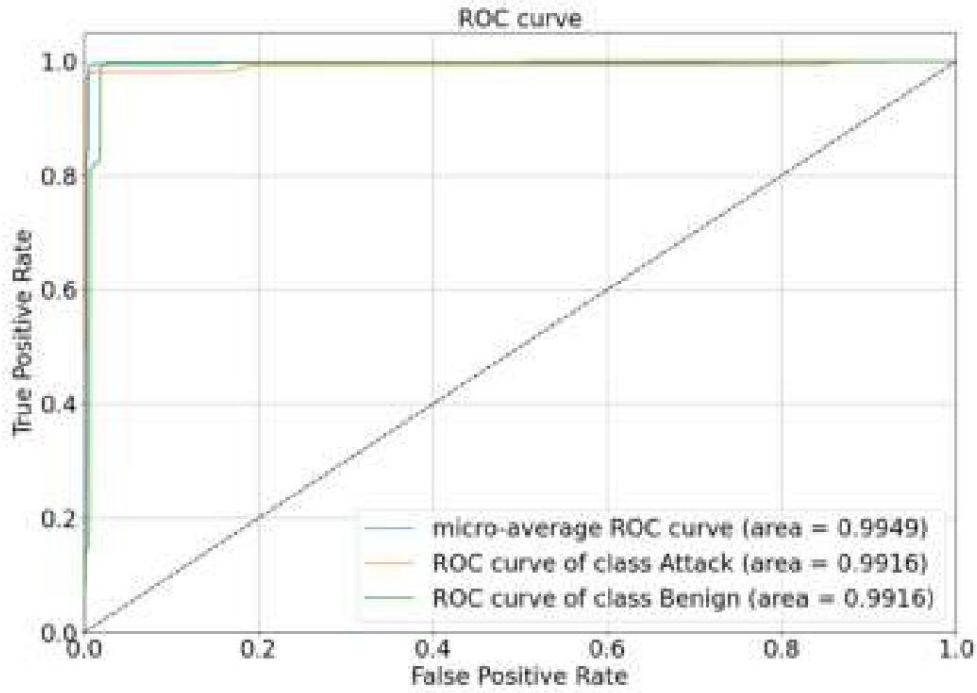


Figure 10. Le ROC de DBELS sur la classification binaire.

tt

tt

Machine Translated by Google

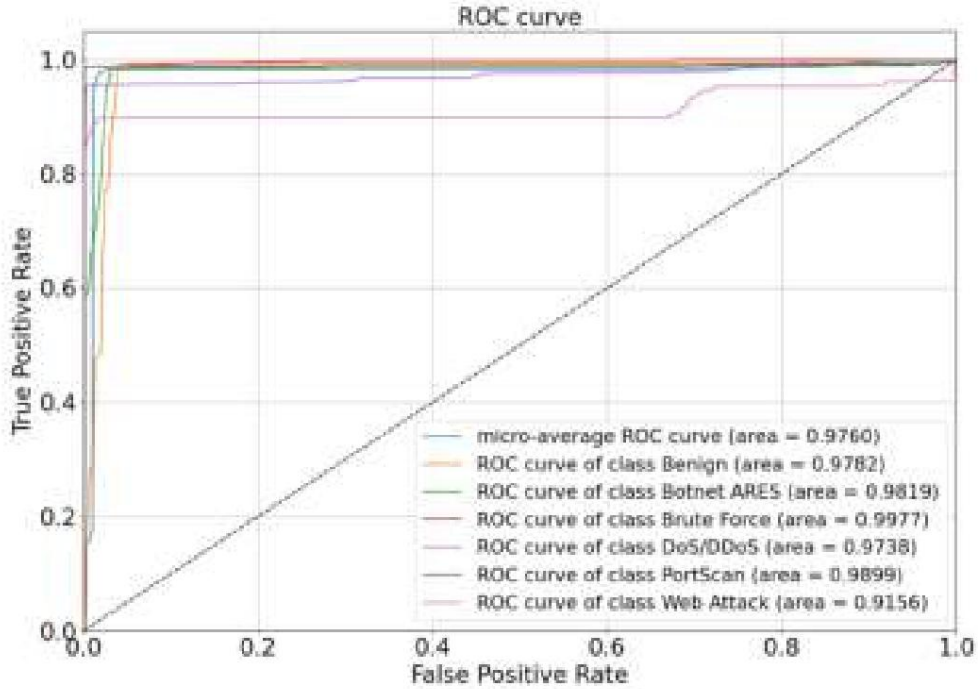


Figure 11. Le ROC de DeBELS sur la multi-classification.

4.7. Comparaison avec les méthodes de l'état de l'art

4.7.1. Classification binaire Le

taux de fausses alarmes et le coût en temps de tous les algorithmes ont été comparés sur la tâche de classification binaire, comme le montre la figure 12. Pour FPR, le modèle proposé avait un taux de fausses alarmes inférieur de 0,014, ce qui était meilleur que les autres modèles. Cela indique que le modèle proposé qualifie à tort les situations normales d'anormales moins souvent et qu'il identifie et classe correctement les situations normales plus souvent, par rapport à d'autres méthodes. Pour le temps de formation du modèle, le modèle proposé nécessitait moins de temps de formation et de détection dans la tâche de classification binaire, avec une consommation de temps d'environ 1 s. Le coût en temps du modèle est bien inférieur à celui du modèle d'apprentissage profond et présente un avantage par rapport aux autres algorithmes d'apprentissage automatique, ce qui peut réduire considérablement le coût en temps et garantir une formation plus rapide du modèle pour des ensembles de données à grande échelle.

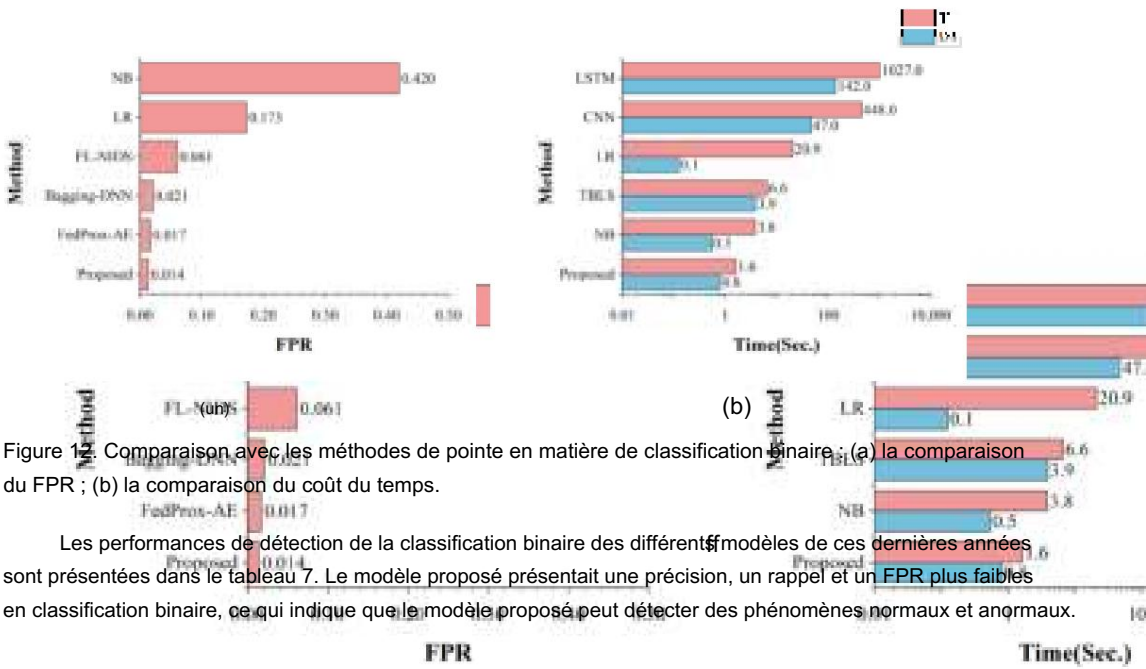


Figure 12. Comparaison avec les méthodes de pointe en matière de classification binaire : (a) la comparaison du FPR ; (b) la comparaison du coût du temps.

Les performances de détection de la classification binaire des différents modèles de ces dernières années sont présentées dans le tableau 7. Le modèle proposé présentait une précision, un rappel et un FPR plus faibles en classification binaire, ce qui indique que le modèle proposé peut détecter des phénomènes normaux et anormaux.

Machine Translated by Google

se comporte bien. Comparé aux modèles d'apprentissage automatique traditionnels, le modèle proposé surpasse la régression logistique (LR) et le bayes naïf (NB) en termes de précision, de rappel et FPR. Par rapport à d'autres modèles basés sur BLS, la précision et le rappel sont meilleurs que ceux du TBLS. Comparé aux modèles d'apprentissage profond, le modèle proposé surpasse la plupart des modèles, et les performances de la fusion du réseau neuronal profond statistique (FS-DNN) et du réseau neuronal convolutif évolutif multi-objectif (MECNN) sont légèrement supérieures à le modèle proposé ; cependant, comme les deux modèles sont basés sur des modèles d'apprentissage profond, leur la taille du modèle et le coût du temps de formation sont beaucoup plus élevés que le modèle basé sur BLS. Considérant le modèle de réseau neuronal profond d'apprentissage d'ensemble de bagging (Bagging-DNN), sa précision est inférieur au modèle proposé, et son rappel est légèrement supérieur au modèle proposé, mais en plus de la complexité spatiale et temporelle plus élevée apportée par son modèle d'apprentissage profond, le taux de fausses alarmes est également plus élevé que le modèle proposé. En résumé, la proposition le modèle a de meilleures performances de détection et un taux de fausses alarmes plus faible en classification binaire et présente des avantages évidents par rapport aux autres modèles.

Tableau 7. Comparaison avec les méthodes de classification binaire les plus récentes.

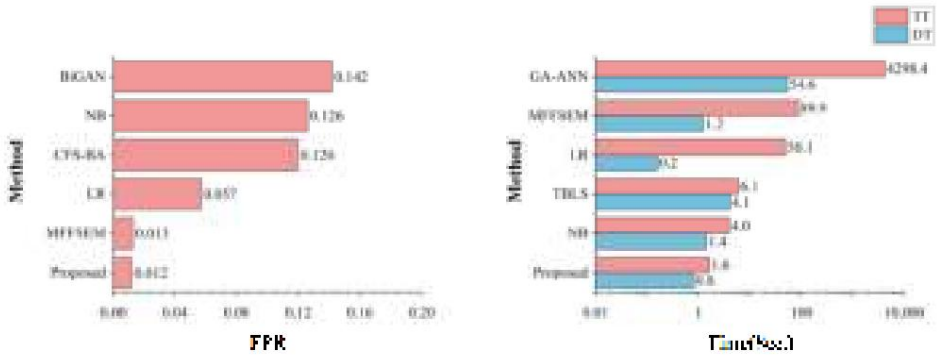
Méthode	Précision	Rappel	FPR
Notre étude	0,992	0,986	0,014
G / D	0,934	0,827	0,173
N.-B.	0,307	0,580	0,420
DCAE	0,925	0,925	-
TBLS(W) [18]	0,982	0,975	-
DNN [18]	0,868	-	-
CNN [18]	0,844	-	-
LSTM [18]	0,365	-	-
2D-CNN [26]	0,980	-	-
CNN-LSTM [27]	0,930	0,768	-
FS-DNN [28]	0,998	0,999	0,012
MECNN [29]	0,998	0,998	-
Ensachage-DNN [30]	0,987	0,999	0,021
FL-NIDS [31]	0,943	0,947	0,061
FedProx-AE [32]	0,935	-	0,017

4.7.2. Multi-Classification

Le taux de faux positifs et le coût en temps de tous les autres algorithmes sur la multi-classification Les tâches sont illustrées à la figure 13. Les graphiques FPR montrent que le modèle proposé n'avait qu'un Taux de faux positifs de 0,012, ce qui est inférieur aux autres modèles. Cela signifie que le modèle peut mieux reconnaître les différentes catégories d'attaques et les classifier moins souvent au cours de l'enquête. tâche de multi-classification et effectuer la tâche de détection et d'identification des échantillons d'attaque mieux. Le modèle nécessitait moins de temps de formation et de détection par rapport aux autres modèles, offrant des avantages dans la gestion de données à grande échelle et améliorant son adéquation pour environnements d'ensembles de données du monde réel.

Les performances de détection multi-classification des différents modèles au cours des dernières années sont donné dans le tableau 8. Le modèle proposé a une précision et un rappel plus élevés et un FPR inférieur sous tâche multi-classification, ce qui indique que le modèle proposé peut détecter à la fois la normale et les comportements anormaux et mieux détecter chaque classe spécifique d'attaques. Comparant les algorithmes d'apprentissage automatique traditionnels, on voit que le modèle proposé surpasse LR et NB en termes d'exactitude, de rappel et de FPR. Comparé aux autres modèles BLS, le Le modèle TBLS(W) a une précision et un rappel légèrement supérieurs à ceux du modèle proposé, car, pour le TBLS, les auteurs ont uniquement sélectionné l'ensemble de données d'une seule journée, mercredi, pour le modèle formation et tests. Il ne représente que 30 % de l'ensemble total de données et les types d'attaques sont toutes les attaques de type DoS/DDoS, mieux équilibrées par rapport à l'ensemble des données totales, et les performances de détection du modèle seront affectées dans une certaine mesure.

Machine Translated by Google



(un) (b)

Figure 13. La comparaison avec les méthodes de pointe sur la multi-classification : (a) la comparaison du FPR; (b) la comparaison du coût du temps.

Tableau 8. La comparaison avec les méthodes de l'état de l'art sur la multi-classification.

Méthode	Précision	Rappel	FPR
Notre étude	0,958	0,947	0,012
G / D	0,934	0,301	0,057
N.-B.	0,286	0,746	0,126
GA-ANN	0,815	-	-
GSPSO-ANN	0,840	-	-
TBLS(W) [18]	0,978	0,977	-
BiGAN [33]	0,823	0,763	0,142
MFFSEM(W) [2]	0,999	0,999	0,013
DNN [34]	0,946	0,846	-
MECNN [29]	0,997	0,791	-
AdaBoost [35]	0,889	0,234	-
SDAE-SVM [36]	0,954	0,444	-
GRU [37]	0,985	0,742	-
LSTM [38]	0,989	0,748	-
CFS-BA(W) [39]	0,999	0,999	0,120

Par rapport aux autres algorithmes d'apprentissage automatique, pour le multidimensionnel mécanisme d'ensemble de fusion et d'empilement de fonctionnalités (MFFSEM) et fonctionnalité basée sur la corrélation Modèles d'algorithme de sélection de chauve-souris (CFS-BA), les performances de détection sont meilleures que cela du modèle proposé, mais leurs FPR sont supérieurs au modèle proposé, ce qui conduira à eux, jugeant trop mal le comportement normal comme une attaque. Les deux modèles sont également formés avec le même ensemble de données d'un seul jour, mercredi. Par rapport au long court terme modèle de mémoire (LSTM), sa précision est légèrement supérieure au modèle proposé, mais son le rappel est bien inférieur au modèle proposé, ce qui signifie que le modèle LSTM ne parvient pas à reconnaître bien les attaques. En résumé, comparé à d'autres modèles, le modèle proposé présente des avantages tels que de meilleures performances de détection et un taux de fausses alarmes plus faible lorsque effectuer la tâche de multi-classification.

5. Validation du modèle

Le trafic réseau dans les environnements réels est important et complexe ; pour évaluer le DBELS mieux modéliser et simuler l'effet des environnements réels, nous avons sélectionné le CICIDS2018 ensemble de données pour tester et valider les performances du modèle dans différents environnements de données. Le L'ensemble de données CICIDS2018 est un ensemble de données largement utilisé dans la recherche sur la cybersécurité et a été créé par l'Institut canadien de recherche sur la cybersécurité, qui simule un réseau du monde réel trafic, y compris le trafic normal et de nombreux types d'attaques. Par rapport au CICIDS2017 ensemble de données, sa taille a été multipliée par quatre et contient plus de huit millions registres de circulation ; cependant, il présente également un grave déséquilibre des données. L'ensemble de données contient plus de

Machine Translated by Google

huit millions d'enregistrements de trafic avec jusqu'à 80 fonctionnalités par échantillon. Ces données couvrent à la fois trafic normal et un large éventail de trafic d'attaque, avec des types d'échantillons comprenant principalement Bénin, DoS/DDoS, Brute Force, Botnet et Infiltration. La diversité et la complexité de les types d'échantillons de l'ensemble de données CICIDS 2018 font de l'ensemble de données un meilleur reflet des cybermenaces réelles, ce qui permet d'évaluer de manière exhaustive les performances et les capacités de généralisation des systèmes de détection d'intrusion.

Les expériences de validation du modèle utilisant l'ensemble de données CICIDS2018 comprenaient le prétraitement des données et la réduction de la dimensionnalité des données, et la forme des opérations est restée conforme au CICIDS2017. Les modèles pour leurs expériences de comparaison incluent BLS, DT, Nouveau-Brunswick, MLP et CNN. Pour garantir la validité des expériences, le prétraitement des données est la même chose, et toutes les expériences sont menées dans un environnement de consentement. L'évaluation les paramètres de l'expérience de comparaison comprenaient l'exactitude, le rappel, le taux de faux positifs et temps de formation. Les performances de différents modèles dans le cadre de la tâche de classification binaire est présentée dans le tableau 9, et les performances dans le cadre de la tâche de classification multiple sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 9. Performances des différentes méthodes de classification binaire pour l'ensemble de données CICIDS2018.

Méthode	Métrique d'évaluation			
	Précision	Rappel	FPR	Fois)
Notre étude	0,981	0,956	0,044	5,295
BLS	0,958	0,931	0,069	18.826
DT	0,917	0,862	0,138	16.770
N.-B.	0,791	0,742	0,258	2.556
MLP	0,963	0,933	0,067	861.788
CNN	0,957	0,926	0,074	949.476

Tableau 10. Performances des différentes méthodes de multi-classification pour l'ensemble de données CICIDS2018.

Méthode	Métrique d'évaluation			
	Précision	Rappel	FPR	Fois)
Notre étude	0,946	0,923	0,016	4.731
BLS	0,953	0,702	0,031	12.729
DT	0,891	0,499	0,060	17.266
N.-B.	0,828	0,860	0,047	2.694
MLP	0,934	0,485	0,046	1025.025
CNN	0,966	0,785	0,026	916.550

Les résultats montrent que notre modèle proposé surpasse la plupart des autres modèles en termes de précision, rappel, FPR et coût du temps sous différentes tâches de classification. Pour la classification binaire tâche, par rapport à la structure BLS traditionnelle, la précision et le rappel sont améliorés de 0,023 et 0,025, respectivement, et le taux de fausses alarmes est diminué de 0,025. Comparé au Les algorithmes traditionnels d'apprentissage automatique DT et NB présentent tous deux une amélioration significative des performances de détection, tandis que le taux de fausses alarmes est considérablement réduit. Pour les algorithmes de deep learning MLP et CNN, les performances de détection sont améliorées et le temps de formation du modèle est considérablement réduit. Pour la tâche multi-classification, le le modèle proposé maintient également des performances de détection élevées et un faible temps de formation du modèle, et par rapport au modèle NB, il présente un avantage significatif en termes de performances de détection, bien que le temps de formation du modèle soit légèrement amélioré. Par rapport au modèle CNN, bien que la précision diminue légèrement de 0,02, elle est meilleure que le modèle CNN en termes de rappel, de FPR et de temps de formation du modèle.

Machine Translated by Google

À partir des résultats expérimentaux ci-dessus, on peut conclure que le modèle proposé peut encore montrer de meilleures performances de détection face à l'ensemble de données CICIDS2018 à une échelle plus grande et plus complexe, ce qui indique en outre que le modèle possède un certain degré d' évolutivité et d'adaptabilité. L'échelle de cet ensemble de données est considérablement augmentée par rapport à l' ensemble de données CICIDS2017 ; cependant, le modèle proposé peut toujours maintenir une faible consommation de temps , ce qui vérifie en outre que le modèle a un certain degré d'adaptabilité et de légèreté pour des environnements réels complexes. Le modèle proposé démontre systématiquement de fortes performances de détection et une faible consommation de temps sur divers ensembles de données, que ce soit pour la classification binaire ou multi-classes. Cette efficacité est cruciale pour les applications du monde réel, où le maintien d'une précision et d'une vitesse élevées est essentiel. De plus, l'adaptabilité du modèle à différents environnements de données et sa robustesse contre diverses menaces améliorent sa valeur pratique. Son évolutivité lui permet de gérer des volumes de données croissants, ce qui en fait une solution polyvalente dans les paysages dynamiques de cybersécurité.

6. Conclusions

Dans cet article, basé sur le modèle BLS et introduisant l'idée de repondération EQL v2, nous proposons un modèle DBELS, qui vise à résoudre le problème du BLS traditionnel confronté à de faibles taux de détection pour des ensembles de données de grande dimension et déséquilibrés dans le domaine des NIDS, ainsi que la faible reconnaissance des attaques de classe minoritaire. Premièrement, le modèle apprend pleinement l'ensemble de données de grande dimension à grande échelle via DBN, entraîne entièrement chaque structure RBM, capture la structure optimale et les informations clés de l'ensemble de données de grande dimension et le représente comme un ensemble de données de faible dimension optimal. Par la suite, le modèle BELS est appliqué pour apprendre la classification de l'ensemble de données de faible dimension, et le degré d'apprentissage du modèle sur les échantillons de classes minoritaires est amélioré en ajustant les facteurs de gradient positifs et négatifs pour augmenter le poids de classification du modèle et renforcer la reconnaissance des attaques de classe minoritaire. Le DBELS est entièrement testé expérimentalement à l'aide de l'ensemble de données CICIDS2017 et notre modèle proposé surpasse les autres algorithmes en termes de précision, de rappel, de FPR et de temps. Enfin, l'utilité du modèle proposé est testée et validée davantage avec l'ensemble de données CICIDS2018. Les résultats montrent que notre modèle DBELS proposé présente des avantages significatifs pour résoudre le problème des données de détection d'intrusion réseau de grande dimension et déséquilibrées et atténue les problèmes de long temps de formation des systèmes de détection d'intrusion et de faible reconnaissance des attaques de classe minoritaire, ce qui en fait un modèle idéal. méthode pratique de détection d'intrusion. Nous prévoyons d'introduire des stratégies d'initialisation et des techniques d'apprentissage de flux à l'avenir pour améliorer la stabilité et les performances de détection du BLS. En outre, nous prévoyons d'utiliser des algorithmes avancés pour améliorer la robustesse du modèle et améliorer son adaptabilité e

Contributions des auteurs : Conceptualisation, MD ; méthodologie, MD et CS ; logiciels, MD, CS et YK ; validation, MD; enquête, CS, MD et SF ; ressources, XZ ; conservation des données, CS et SF ; rédaction – préparation de l'ébauche originale, MD et HX ; rédaction – révision et édition, MD et HX ; visualisation, MD et YK ; supervision, XZ et HX Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (62276091).

Déclaration de disponibilité des données : les données seront mises à disposition sur demande.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Anderson, JP Surveillance et surveillance des menaces de sécurité informatique ; Rapport technique; Société James P. Anderson : Washington, DC, États-Unis, 1980.
2. Zhang, H. ; Li, J.-L. ; Liu, X.-M. ; Dong, C. Mécanisme d'ensemble de fusion et d'empilement de fonctionnalités multidimensionnelles pour le réseau détection d'intrusion. Futur Gén. Calculer. Système. 2021, 122, 130-143. [Référence croisée]
3. Sain, H. ; Purnami, SW Combinez une machine vectorielle de support d'échantillonnage pour une classification de données déséquilibrée. Procedia Comput. Sci. 2015, 72, 59-66. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

4. Thapa, N. ; Liu, Z. ; Kc, DB ; Gokaraju, B. ; Roy, K. Comparaison des modèles d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond pour le réseau systèmes de détection d'intrusion. Internet du futur 2020, 12, 167. [CrossRef]
5. Namakshenas, D. ; Yazdinejad, A. ; Dehghantanha, A. ; Srivastava, G. Modèle de détection des menaces fédéré et quantique préservant la confidentialité pour l'Internet des objets grand public. IEEETrans. Consommer. Électron. 2024. [Référence croisée]
6. Almiani, M. ; AbuGhazleh, A. ; Al-Rahayfeh, A. ; Atiewi, S. ; Razaque, A. Réseau neuronal récurrent profond pour la détection d'intrusion IoT système. Simul. Modèle. Entraînez-vous. Théorie 2020, 101, 102031. [CrossRef]
7. Wu, P. Apprentissage profond pour la détection des intrusions dans le réseau : reconnaissance des attaques avec l'intelligence informatique ; UNSW : Sydney, Australie, 2020.
8. Yazdinejad, A. ; Dehghantanha, A. ; Karimipour, H. ; Srivastava, G. ; Parizi, RM Un modèle d'apprentissage fédéré robuste préservant la confidentialité contre les attaques d'empoisonnement de modèle. IEEETrans. Inf. Sécurité médico-légale. 2024, 19, 6693-6708. [Référence croisée]
9. Yazdinejad, A. ; Dehghantanha, A. ; Srivastava, G. ; Karimipour, H. ; Parizi, RM La confidentialité hybride préserve l'apprentissage fédéré contre les utilisateurs irréguliers dans l'Internet des objets de nouvelle génération. J. Syst. Archit. 2024, 148, 103088. [Réf. croisée]
10. Chen, CP ; Liu, Z. Système d'apprentissage étendu : un système d'apprentissage progressif efficace et efficient sans avoir besoin d'une approche approfondie. architecture. IEEETrans. Réseau neuronal. Apprendre. Système. 2017, 29, 10-24. [Référence croisée] [Pub Med]
11. Gong, X. ; Zhang, T. ; Chen, CP ; Liu, Z. Revue de recherche sur un système d'apprentissage général : algorithmes, théorie et applications. IEEETrans. Cybern. 2021, 52, 8922-8950. [Référence croisée]
12. Li, Z. ; Ríos, ALG ; Xu, G. ; Trajkovi´c, L. Techniques d'apprentissage automatique pour classifier les anomalies et les intrusions de réseau. Dans Actes du Symposium international IEEE 2019 sur les circuits et les systèmes (ISCAS), Sapporo, Japon, 26-29 mai 2019 ; p. 1 à 5.
13. Wu, T. ; Fan, H. ; Zhu, H. ; Vous, C. ; Zhou, H. ; Huang, X. Le système de détection d'intrusion combine une forêt aléatoire améliorée avec SMOTE algorithme. EURASIP J.Adv. Processus de signal. 2022, 2022, 39. [Réf. croisée]
14. Zhang, B. ; Liu, Z. ; Jia, Y. ; Ren, J. ; Zhao, X. Méthode de détection d'intrusion réseau basée sur l'algorithme PCA et Bayes. Sécurisé. Commun. Réseau. 2018, 2018, 1914980. [Réf. croisée]
15. Li, Z. ; Batta, P. ; Trajkovic, L. Comparaison des algorithmes d'apprentissage automatique pour la détection des intrusions réseau. Dans Actes de la Conférence internationale IEEE 2018 sur les systèmes, l'homme et la cybernétique (SMC), Miyazaki, Japon, 7-10 octobre 2018 ; pages 4248 à 4253.
16. Ríos, ALG ; Li, Z. ; Xu, G. ; Alonso, AD; Trajkovi´c, L. Détection des anomalies de réseau et des intrusions dans les réseaux de communication. Dans Actes de la 23e Conférence internationale de l'IEEE 2019 sur les systèmes d'ingénierie intelligents (INES), Gödöll˝o, Hongrie, 25-27 avril 2019 ; pages 000029 à 000034.
17. Ríos, ALG ; Li, Z. ; Bekchentayeva, K. ; Trajkovi´c, L. Détection des attaques par déni de service dans les réseaux de communication. Dans Actes du Symposium international IEEE 2020 sur les circuits et les systèmes (ISCAS), Séville, Espagne, 12-14 octobre 2020 ; p. 1 à 5.
18. Li, J. ; Zhang, H. ; Liu, Z. ; Liu, Y. Détection d'intrusion réseau via un système d'apprentissage tri-large basé sur la granularité spatio-temporelle. J. Supercalculateur. 2023, 79, 9180-9205. [Référence croisée]
19. Ahmad, T. ; Aziz, MN Prétraitement des données et sélection de fonctionnalités pour les systèmes de détection d'intrusion par apprentissage automatique. ICIC Express Lett. 2019, 13, 93-101.
20. Hao, X. ; Jiang, Z. ; Xiao, Q. ; Wang, Q. ; Yao, Y. ; Liu, B. ; Liu, J. Produire plus avec moins : une approche de détection des attaques réseau basée sur le GAN pour les données déséquilibrées. Dans les actes de la 24e conférence internationale de l'IEEE 2021 sur le travail coopératif en conception assisté par ordinateur (CSCWD), Dalian, Chine, 5-7 mai 2021 ; pp. 384-390.
21. Tan, J. ; Lu, X. ; Zhang, G. ; Yin, C. ; Li, Q. Perte d'égalisation v2 : une nouvelle approche d'équilibre de gradient pour la détection d'objets à longue queue. Dans Actes de la conférence IEEE/CVF sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, Nashville, Tennessee, États-Unis, 20-25 juin 2021 ; pages 1685 à 1694.
22. Shen, Z. ; Zhang, Y. ; Chen, W. Une méthode de détection d'intrusion par classification bayésienne basée sur la fusion de PCA et LDA. Sécurisé. Commun. Réseau. 2019, 2019, 6346708. [Réf. croisée]
23. Salo, F. ; Nassif, Alberta; Essex, A. Réduction de dimensionnalité avec IG-PCA et classificateur d'ensemble pour la détection d'intrusion dans le réseau. Calculer. Réseau. 2019, 148, 164-175. [Référence croisée]
24. Hinton, GE; Osindero, S. ; Eh bien, Y.-W. Un algorithme d'apprentissage rapide pour les réseaux de croyances profondes. Calcul neuronal. 2006, 18, 1527-1554. [Référence croisée] [Pub Med]
25. Belarbi, O. ; Khan, A. ; Carnelli, P. ; Spyridopoulos, T. Un système de détection d'intrusion basé sur des réseaux de croyance profonde. Dans Actes de la Conférence internationale sur la science de la cybersécurité, Shimane, Japon, 10-12 août 2022 ; pp. 377-392.
26. Andresini, G. ; Appice, A. ; Malerba, D. Détection d'intrusion basée sur le cluster le plus proche via des réseaux neuronaux convolutifs. Connaître. Système basé. 2021, 216, 106798. [Réf. croisée]
27. Kim, A. ; Parc, M. ; Lee, DH AI-IDS : Application de l'apprentissage profond à la détection des intrusions Web en temps réel. Accès IEEE 2020, 8, 70245-70261. [Référence croisée]
28. Thakkar, A. ; Lohiya, R. Fusion d'importance statistique pour la sélection de fonctionnalités dans la détection d'intrusion basée sur un réseau neuronal profond Système. Inf. Fusion 2023, 90, 353-363. [Référence croisée]
29. Chen, Y. ; Lin, Q. ; Wei, W. ; Ji, J. ; Wong, K.-C.; Coello, CAC Détection d'intrusion à l'aide d'un réseau neuronal convolutif évolutif multi-objectif pour l'Internet des objets dans le Fog computing. Connaître. Système basé. 2022, 244, 108505. [Réf. croisée]
30. Thakkar, A. ; Lohiya, R. Classification des attaques de données d'intrusion déséquilibrées pour le réseau IoT à l'aide d'un apprentissage approfondi basé sur l'ensemble réseau neuronal. IEEE Internet Things J. 2023, 10, 11888-11895. [Référence croisée]

Machine Translated by Google

31. Mulyanto, M. ; Faisal, M. ; Prakosa, Sud-Ouest ; Leu, J.-S. Efficacité de la perte focale pour la classification minoritaire en cas d'intrusion réseau systèmes de détection. Symétrie 2020, 13, 4. [CrossRef]
32. Idrissi, MJ; Alami, H. ; El Mahdaouy, A. ; El Mekki, A. ; Oualil, S. ; Yartaoui, Z. ; Berrada, I. Fed-anids : Apprentissage fédéré pour systèmes de détection d'intrusion dans les réseaux basés sur les anomalies. Système expert. Appl. 2023, 234, 121000. [Réf. croisée]
33. Yao, W. ; Shi, H. ; Zhao, H. Détection d'intrusion évolutive basée sur les anomalies pour un Internet des objets sécurisé à l'aide de réseaux adverses génératifs dans un environnement de brouillard. J. Réseau. Calculer. Appl. 2023, 214, 103622. [Réf. croisée]
34. José, J. ; Jose, DV Algorithmes d'apprentissage profond pour les systèmes de détection d'intrusion dans l'Internet des objets à l'aide de l'ensemble de données CIC-IDS 2017. Int. J. Electr. Calculer. Ing. (IJECE) 2023, 13, 1134-1141. [Référence croisée]
35. Rojas, R. AdaBoost et le super bol de classificateurs, un tutoriel d'introduction au boosting adaptatif. Université libre. Berl. Technologie. Rapport 2009, 1, 1–6.
36. Lv, Z. ; Qiao, L. ; Li, J. ; Song, H. Problèmes de sécurité liés à l'apprentissage profond dans l'Internet des objets. IEEE Internet Things J. 2020, 8, 9531-9538. [Référence croisée]
37. Assis, MV ; Carvalho, LF; Lloret, J. ; Proença Jr, ML Un système d'apprentissage en profondeur GRU contre les attaques dans les réseaux définis par logiciel. J. Réseau. Calculer. Appl. 2021, 177, 102942. [CrossRef]
38. Imrana, Y. ; Xiang, Y. ; Un peu.; Abdul-Rauf, Z. Une approche d'apprentissage profond LSTM bidirectionnel pour la détection d'intrusion. Système expert. Appl. 2021, 185, 115524. [Réf. croisée]
39. Zhou, Y. ; Cheng, G. ; Jiang, S. ; Dai, M. Création d'un système de détection d'intrusion efficace basé sur la sélection de fonctionnalités et un classificateur d'ensemble. Calculer. Réseau. 2020, 174, 107247. [Réf. croisée]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.