

Matjaž Mihelj · Tadej Bajd

Aleš Ude · Jadran Lenarčič

Aleš Stanovnik · Marko Munih

Jure Rejc · Sebastjan Šlajpah

Robotique

Deuxième édition

Robotique

Matjaž Mihelj • Tadej Bajd • Aleš Ude
Jadran Lenarčič • Aleš Stanovnik
Marko Munih • Jure Rejc • Sebastjan Šlajpah

Robotique

Deuxième édition

123

Matjaz Mihelj
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

Tadej Bajd
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

Aleš Ude
Département d'Automatique,
Biocybernétique et robotique
Institut Jožef Stefan
Ljubljana, Slovénie

Jadran Lenarčič
Institut Jožef Stefan
Ljubljana, Slovénie

Aleš Stanovnik
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

Marko Munih
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

Jure Rejc
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

Sebastjan Šlajpah
Faculté de génie électrique
Université de Ljubljana
Ljubljana, Slovénie

ISBN 978-3-319-72910-7

ISBN 978-3-319-72911-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4>

Numéro de contrôle de la Bibliothèque du Congrès : 2018946678

1ère édition : © Springer Science+Business Media BV 2010 2e édition : ©

Springer International Publishing AG, partie de Springer Nature 2019 Ce travail est soumis au droit d'auteur. Tous les droits sont réservés à l'Éditeur, qu'il s'agisse de tout ou partie du matériel, notamment les droits de traduction, de réimpression, de réutilisation des illustrations, de récitation, de diffusion, de reproduction sur microfilms ou de toute autre manière matérielle, de transmission ou de stockage des informations. et récupération, adaptation électronique, logiciel informatique, ou par une méthodologie similaire ou différente actuellement connue ou développée ultérieurement.

L'utilisation de noms descriptifs généraux, de noms déposés, de marques de commerce, de marques de service, etc. dans cette publication n'implique pas, même en l'absence d'une mention spécifique, que ces noms sont exemptés des lois et règlements de protection pertinents et donc libres d'utilisation générale. utiliser.

L'éditeur, les auteurs et les éditeurs sont sûrs de supposer que les conseils et les informations contenus dans ce livre sont considérés comme vrais et exacts à la date de publication. Ni l'éditeur, ni les auteurs ou les éditeurs ne donnent de garantie, expresse ou implicite, concernant le matériel contenu dans ce document ou pour toute erreur ou omission qui aurait pu être commise. L'éditeur reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.

Imprimé sur du papier sans acide

Cette empreinte Springer est publiée par la société enregistrée Springer International Publishing AG faisant partie de Springer Nature

L'adresse enregistrée de la société est la suivante : Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Suisse

Préface

Il est peut-être difficile de s'entendre sur ce qu'est un robot, mais la plupart des personnes travaillant dans la robotique citeraient probablement le « père de la robotique », Joseph F. Engelberger (1925-2015), un pionnier de la robotique industrielle, déclarant « je ne peux pas définir un robot, mais j'en reconnais un quand j'en vois un ».

Le mot robot ne provient pas d'un vocabulaire scientifique ou technique, mais a été utilisé pour la première fois dans le drame tchèque "RUR" (Rossum's Universal Robots) de Karel Čapek, qui a été joué pour la première fois à Prague en 1921. Le mot lui-même a été inventé par son frère Josef. Dans le drame, le robot est un être humain artificiel qui est un travailleur brillant, dépourvu de toutes les « qualités inutiles », telles que les émotions, la créativité et la capacité de ressentir la douleur. Dans le prologue du drame, la définition suivante des robots est donnée : « Les robots ne sont pas des personnes (Roboti nejsou lidé). Ils sont mécaniquement plus parfaits que nous, ils ont une capacité intellectuelle stupéfiante, mais ils n'ont pas d'âme. La création d'un ingénieur est techniquement plus raffinée que le produit de la nature ».

Le livre Robotics a évolué au fil de décennies d'enseignement de la robotique à la Faculté de génie électrique de l'Université de Ljubljana, en Slovénie, où le premier manuel sur la robotique industrielle a été publié en 1980 (A. Kralj et T. Bajd, "Industrijska robotika"). La manière de présenter ce sujet plutôt exigeant a été testée avec succès auprès de plusieurs générations d'étudiants de premier cycle.

La deuxième édition du livre perpétue l'héritage de la première édition qui a remporté la distinction Outstanding Academic Title du magazine de bibliothèque CHOICE en 2011. La principale caractéristique du livre reste sa simplicité. Le chapitre d'introduction couvre désormais de manière exhaustive différentes classes de robots, l'accent étant mis sur les robots industriels. La position, l'orientation et le déplacement d'un objet sont décrits par des matrices de transformation homogènes. Ces matrices, qui sont à la base de toute analyse des mécanismes robotiques, sont introduites par des raisonnements géométriques simples. Les modèles géométriques du mécanisme du robot sont expliqués à l'aide d'une description vectorielle originale et conviviale. Le monde du roboticien étant en six dimensions, l'orientation des effecteurs terminaux du robot a reçu plus d'attention dans cette édition.

La cinématique et la dynamique du robot sont introduites via un mécanisme avec seulement deux degrés de liberté de rotation, qui est cependant une partie importante des structures de robots industriels les plus populaires. La présentation de la dynamique des robots est basée uniquement sur la connaissance de la loi de Newton et a en outre été simplifiée pour faciliter la compréhension de cette matière relativement complexe. L'espace de travail joue un rôle important dans la sélection d'un robot adapté à la tâche planifiée. La cinématique des robots parallèles est significativement différente de la cinématique des manipulateurs en série et mérite une attention supplémentaire.

Les capteurs de robots présentés dans cette édition sont pertinents non seulement pour les manipulateurs industriels, mais également pour les systèmes complexes tels que les robots humanoïdes. La vision des robots joue un rôle de plus en plus important dans les applications industrielles et la planification de la trajectoire des robots est une condition préalable à la réussite du contrôle des robots. Les schémas de contrôle de base, résultant soit en la trajectoire finale souhaitée, soit en la force entre le robot et son environnement, sont expliqués. Les environnements de robots sont illustrés par des processus d'assemblage de produits, où les robots font partie d'une chaîne de production ou fonctionnent comme des unités complètement indépendantes. Des préhenseurs robotisés, des outils et des dispositifs d'alimentation sont également décrits.

L'atelier devenant de plus en plus complexe, l'interaction entre les humains et les robots sera inévitable. Les robots collaboratifs sont conçus pour une interaction homme-robot en toute sécurité. La flexibilité de la production peut encore être augmentée avec l'utilisation de robots mobiles à roues. Un aperçu du futur, où humains et robots seront compagnons, est présenté dans le chapitre sur la robotique humanoïde, dont la complexité nécessite des connaissances plus poussées en mathématiques. Le chapitre sur la normalisation et la mesure de la précision et de la répétabilité intéresse les utilisateurs de robots industriels.

Le livre nécessite un minimum de connaissances avancées en mathématiques et en physique. Il convient donc aux cours d'initiation à la robotique des facultés de génie (électrique, mécanique, informatique, civil). Il pourrait également être intéressant pour les ingénieurs qui n'ont pas étudié la robotique, mais qui ont rencontré des robots dans l'environnement de travail et qui souhaitent acquérir des connaissances de base de manière simple et rapide.

Ljubljana, Slovénie
Avril 2018

Matjaz Mihelj
Tadej Bajd

Contenu

1	Présentation	1
1.1	Robot Manipulateur	4
1.2	Robotique industrielle	6
2	Matrices de transformation homogènes	11
2.1	Transformation translationnelle	11
2.2	Transformation rotationnelle	12
2.3	Pose et déplacement	16
2.4	Modèle géométrique du robot	19
3	Description géométrique du mécanisme du robot	27
3.1	Paramètres vectoriels d'une paire cinématique	27
3.2	Paramètres vectoriels du mécanisme	31
4	Orientation	39
5	Robot Manipulateur à Deux Segments	49
5.1	Cinématique	49
	Statique	54
5.3	Espace de travail	55
5.4	Dynamique	60
6	Robots parallèles	69
6.1	Caractéristiques des robots parallèles	69
6.2	Dispositions cinématiques des robots parallèles	73
6.3	Modélisation et conception de robots parallèles	78
7	Capteurs robotiques	85
7.1	Principes de détection	85
7.2	Capteurs de mouvement	86
7.2.1	Placement des capteurs	86
7.2.2	Potentiomètre	87

7.2.3	Codeur optique	88
7.2.4	Encodeur magnétique	92
7.2.5	Tachymètre	93
7.2.6	Unité de mesure inertielle	94
7.3	Capteurs de contact	96
7.3.1	Capteur tactile	96
7.3.2	Interrupteur de fin de course et pare-chocs	98
7.3.3	Capteur de force et de couple	98
7.3.4	Capteur de couple d'articulation	101
7.4	Capteurs de proximité et de télémétrie	102
7.4.1	Télémètre à ultrasons	102
7.4.2	Télémètre laser et scanner laser	103
8	Vision robotisée	107
8.1	Configuration du système	107
8.2	Projection vers l'avant	108
8.3	Rétroprojection	113
8.3.1	Caméra unique	113
8.3.2	Séréovision	115
8.4	Traitement d'image	118
8.5	Pose d'objet à partir de l'image	118
8.5.1	Calibrage de la caméra	118
8.5.2	Pose d'objet	120
9	Planification de trajectoire	123
9.1	Interpolation de la trajectoire entre deux points	123
9.2	Interpolation par l'utilisation de points de transit	126
10	Contrôle des robots	133
10.1	Contrôle du Robot en Coordonnées Internes	134
10.1.1	Contrôle PD de la position	135
10.1.2	Contrôle PD de position avec compensation de gravité ...	136
10.1.3	Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse	137
10.2	Contrôle du Robot en Coordonnées Externes	141
10.2.1	Contrôle basé sur la matrice jacobienne transposée	142
10.2.2	Contrôle basé sur la matrice jacobienne inverse	143
10.2.3	Contrôle PD de position avec compensation de gravité ...	144
10.2.4	Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse	144
10.3	Contrôle de la force de	147
	contact 10.3.1 Linéarisation d'un système robotisé par inverse	
	Dynamique	148
	10.3.2 Commande forcée	149

11 Environnement robotique.....	153
11.1 Sécurité des robots	153
11.2 Périphériques du robot dans les processus d'assemblage	158
11.2.1 Configurations de la chaîne de production d'assemblage	158
11.3 Dispositifs d'alimentation	160
11.4 Convoyeurs	164
11.5 Préhenseurs et outils du robot	165
12 Robots Collaboratifs.....	173
12.1 Système de robot industriel collaboratif	173
12.2 Robot collaboratif	175
12.3 Fonctionnement collaboratif.....	177
12.3.1 Arrêt surveillé de sécurité	178
12.3.2 Guidage manuel	178
12.3.3 Surveillance de la vitesse et de la séparation	180
12.3.4 Limitation de puissance et de force	181
12.4 Préhenseurs robots collaboratifs	184
12.5 Applications du système robotique collaboratif	185
13 Robots mobiles.....	189
13.1 Cinématique du robot	190
mobile 13.2 Navigation	197
13.2.1 Localisation	197
13.2.2 Planification de la trajectoire	201
13.2.3 Contrôle de chemin.....	202
14 Robotique humanoïde	209
14.1 Locomotion bipède 211.....	
14.1.1 Point de moment zéro 211.....	
14.1.2 Génération de modèles de marche	213
14.2 Apprentissage par imitation	216
14.2.1 Observation du mouvement humain et de son transfert au mouvement du robot	217
humanoïde 14.2.2 Primitives de mouvement dynamique	221
14.2.3 Propriétés de convergence de la dynamique linéaire Systèmes	222
14.2.4 Primitives de mouvement dynamique pour point à point Mouvements	223
14.2.5 Estimation des paramètres DMP à partir d'un seul Manifestation	225
14.2.6 Modulation des DMP	227
15 Précision et répétabilité des manipulateurs industriels	231
Dérivation de l'accélération en mouvement circulaire	243
Indice	247

Chapitre 1

Introduction



La robotique d'aujourd'hui peut être décrite comme une science traitant du mouvement intelligent de divers mécanismes de robots qui peuvent être classés dans les quatre groupes suivants : robots manipulateurs, véhicules robots, systèmes homme-robot et robots d'inspiration biologique (Fig. 1.1) . Les manipulateurs de robots les plus fréquemment rencontrés sont les mécanismes de robots en série. Le robot manipulateur est représenté par une chaîne en série de corps rigides, appelés segments de robot, reliés par des articulations. Les robots manipulateurs en série seront décrits plus en détail dans la section suivante de ce chapitre. Les robots parallèles suscitent un intérêt considérable tant dans le domaine scientifique que dans l'industrie. Avec ceux-ci, la base et la plate-forme du robot sont reliées l'une à l'autre par des segments parallèles, appelés jambes. Les segments sont équipés d'actionneurs de translation, tandis que les articulations à la base et à la plate-forme sont passives. Les robots parallèles sont principalement utilisés pour les tâches de pick-and-place. Ils se caractérisent par des accélérations, une répétabilité et une précision élevées. Comme les robots manipulateurs remplacent l'opérateur humain dans divers travaux de production, leur taille est souvent similaire à celle d'un bras humain. Les constructeurs peuvent également fournir des robots manipulateurs jusqu'à dix fois plus gros, capables de manipuler des carrosseries complètes. En revanche, dans les domaines de la biotechnologie et des nouveaux matériaux, des micro- et nanorobots sont utilisés. Les nanorobots permettent de pousser, tirer, manipuler, orienter, plier et rainurer à l'échelle des molécules et des particules. Le nanomanipulateur le plus répandu est basé sur le principe du microscope à force atomique. L'actionneur de ce nanomanipulateur est un cristal piézoélectrique dont le mouvement est évalué par l'utilisation d'une source laser et d'une cellule photoélectrique.

Les véhicules robots autonomes se trouvent sur terre, dans l'eau et dans les airs. Les robots mobiles terrestres sont le plus souvent appliqués dans des environnements artificiels, tels que des appartements, des hôpitaux, des grands magasins ou des musées, mais on les trouve de plus en plus sur les autoroutes et même sur des terrains sans chemin. La plupart des robots mobiles sont néanmoins utilisés sur un terrain plat avec un mouvement permis par des roues, trois roues assurant la stabilité nécessaire. Souvent, les roues sont spécialement conçues pour permettre des mouvements omnidirectionnels. Les véhicules robots peuvent être trouvés comme des aspirateurs, des tondeuses à gazon autonomes, des guides intelligents dans les grands magasins ou les musées, des préposés

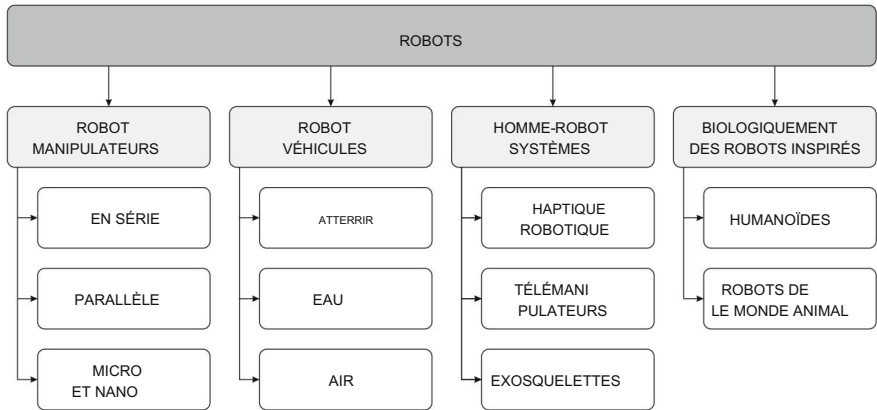


Fig. 1.1 Classification des robots

dans des centres cliniques, des rovers spatiaux ou des voitures autonomes. Les étudiants peuvent prendre plaisir à apprendre dans diverses compétitions, par exemple des jeux de football ou de sauvetage, basés sur l'utilisation de petits robots mobiles. Parmi les véhicules aériens, les plus populaires semblent être les petits quadcoptères. Ils ont une structure mécanique très simple, ce qui les rend relativement peu coûteux. Les quadcoptères volent à l'aide de quatre rotors et sont équipés de capteurs tels que des gyroscopes, des accéléromètres et des caméras, et sont principalement utilisés à des fins de surveillance. Des versions autonomes plus grandes sont utilisées pour les missions de reconnaissance militaire. Les robots à base d'eau flottent à la surface ou fonctionnent sous l'eau.

Les versions sous-marines peuvent avoir la forme de sous-marins autonomes plus petits. Ils peuvent souvent être équipés d'un bras robotisé et utilisés dans la recherche océanique, l'observation des fonds marins ou des épaves de navires ou comme accompagnateurs sur des plates-formes pétrolières. Des robots flottants autonomes sont utilisés pour les évaluations écologiques marines.

Les nouvelles connaissances dans le domaine du contrôle des robots influencent fortement le développement des systèmes homme-robot, tels que les robots haptiques, les télémanipulateurs et les exosquelettes. L'utilisation de robots haptiques est liée aux environnements virtuels qui sont généralement affichés sur les écrans d'ordinateur. Les premiers environnements virtuels fournissaient la vue et le son à l'observateur, mais aucun sens du toucher. Les robots haptiques offrent à l'utilisateur la sensation du toucher, du mouvement limité, de la souplesse, de la friction et de la texture dans un environnement virtuel. Les robots haptiques jouent un rôle important dans la robotique de réadaptation, où de petits robots haptiques sont utilisés pour l'évaluation et l'évaluation des mouvements des membres supérieurs chez les personnes paralysées. Des systèmes haptiques plus puissants peuvent tenir le poignet d'une personne paralysée et guider l'extrémité du bras le long du chemin souhaité qui est montré au sujet dans un environnement virtuel présenté sur l'écran de l'ordinateur. Le robot haptique exerce deux types de forces sur le poignet du sujet. Lorsque le patient est incapable d'effectuer un mouvement le long du chemin qui lui est montré dans l'environnement virtuel, le robot pousse le poignet le long de la trajectoire requise et aide le patient à accomplir la tâche. Le robot n'aide que dans la mesure nécessaire pour que le patient atteigne le point d'arrivée. Lorsque le membre paralysé du patient s'éloigne du

courbe prévue, le robot pousse le poignet au voisinage de la trajectoire requise.

Les télémanipulateurs sont des robots qui sont contrôlés par un opérateur humain lorsqu'il existe une barrière entre le télémanipulateur et l'opérateur humain. La barrière entre l'opérateur et l'environnement de travail est généralement soit la distance (par exemple l'espace extra-atmosphérique) soit la dangerosité (par exemple à l'intérieur d'une centrale nucléaire). Les télémanipulateurs entrent également dans le monde médical, étant utilisés en chirurgie (télémédecine). Les exosquelettes sont des mécanismes actifs qui sont attachés aux membres supérieurs ou inférieurs humains. Ils sont principalement utilisés à des fins de réhabilitation. Les exosquelettes des membres inférieurs peuvent augmenter la force des personnes saines ou permettre la rééducation à la marche des personnes paralysées. Comparativement aux robots de rééducation haptique, les exosquelettes pour les membres supérieurs exercent des forces sur tous les segments du bras paralysé.

Les robots d'inspiration biologique peuvent être divisés en robots humanoïdes et en robots du monde animal. Des exemples du monde animal sont divers types de robots serpents, poissons, quadrupèdes, robots marcheurs à six ou huit pattes. Les robots humanoïdes sont de loin les systèmes robotiques les plus avancés du groupe des robots d'inspiration biologique. Ils sont conçus pour vivre et travailler dans un environnement humain. La propriété la plus notable des robots humanoïdes est leur capacité de marche bipède. Ils marchent avec une démarche statiquement stable ou dynamiquement stable, ils peuvent s'équilibrer en se tenant debout sur une seule jambe, ils se déplacent en accord avec un collègue humain, ils peuvent même courir. Les problèmes actuels de la robotique humanoïde sont liés à la vision artificielle, à la perception et à l'analyse de l'environnement, au traitement du langage naturel, à l'interaction humaine, aux systèmes cognitifs, à l'apprentissage automatique et aux comportements. Certains robots apprennent également de l'expérience en reproduisant des processus naturels tels que les essais et erreurs et l'apprentissage par la pratique, de la même manière qu'un petit enfant apprend. De cette manière, le robot humanoïde acquiert un certain degré d'autonomie, ce qui signifie en outre que les robots humanoïdes peuvent se comporter dans certaines situations d'une manière imprévisible pour leurs concepteurs humains. Les robots humanoïdes débarquent dans nos foyers et deviennent nos partenaires. Ils pourraient bientôt être les compagnons des personnes âgées et des enfants, les assistants des infirmières, des médecins, des pompiers et des ouvriers. Le besoin se fait sentir d'incarner l'éthique dans un robot, ce que l'on appelle la robo-éthique. L'éthique robotique est une éthique appliquée dont l'objectif est de développer des outils scientifiques/culturels/techniques pouvant être partagés par différents groupes sociaux et croyances. Ces outils visent à promouvoir et à encourager le développement de la robotique pour le progrès de la société humaine et des individus, et à aider à prévenir son utilisation abusive contre l'humanité. En 1942, l'éminent romancier Isaac Asimov a formulé ses célèbres trois lois de la robotique. Plus tard, en 1983, il a ajouté la quatrième loi, connue sous le nom de loi zéro : aucun robot ne peut nuire à l'humanité ou, par son inaction, permettre à l'humanité de subir des dommages. La nouvelle génération de robots humanoïdes seront des partenaires qui coexisteront avec les humains en les assistant physiquement et psychologiquement et contribueront à la réalisation d'une société sûre et pacifique. Ils seront potentiellement plus éthiques que les humains.

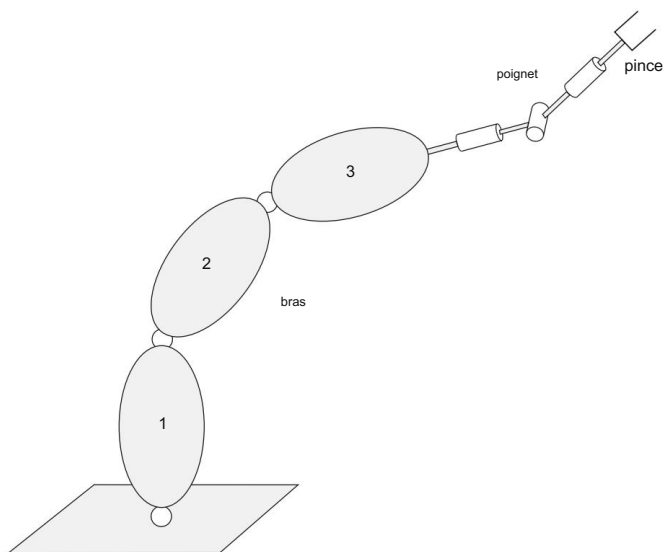


Fig. 1.2 Robot manipulateur

1.1 Robot Manipulateur

Aujourd'hui, les systèmes robotiques les plus utiles et les plus efficaces sont les robots manipulateurs industriels qui peuvent remplacer les travailleurs humains dans des tâches difficiles ou monotones, ou lorsqu'un être humain serait autrement confronté à des conditions dangereuses. Le robot manipulateur se compose d'un bras, d'un poignet et d'une pince de robot (Fig. 1.2). Le bras du robot est une chaîne en série de trois segments rigides relativement longs qui assurent le positionnement du préhenseur dans l'espace de travail. Les segments voisins d'un bras de robot sont reliés par une articulation de robot, qui est (Fig. 1.3) soit en translation (prismatique) soit en rotation (révolution). L'articulation rotative a la forme d'une charnière et limite le mouvement de deux segments voisins à la rotation autour de l'axe de l'articulation. La position relative est donnée par l'angle de rotation autour de l'axe de l'articulation. En robotique, les angles articulaires sont désignés par la lettre grecque θ . Dans les schémas simplifiés le joint tournant est représenté par un cylindre. L'articulation de translation limite le mouvement de deux segments voisins à la translation. La position relative entre deux segments est mesurée comme une distance.

Le symbole de l'articulation de translation est un prisme, tandis que la distance est désignée par la lettre d . Les articulations du robot sont alimentées par des moteurs électriques ou hydrauliques. Les capteurs dans les articulations mesurent l'angle ou la distance, la vitesse et le couple.

Le poignet du robot se compose généralement de trois articulations rotatives. La tâche du poignet du robot est de permettre l'orientation requise de l'objet saisi par la pince du robot.

Le préhenseur du robot à deux ou plusieurs doigts est placé à l'extrémité du robot. Différents outils, pour permettre le perçage, la peinture au pistolet ou les dispositifs de soudage, peuvent également être fixés au point final. Les robots manipulateurs industriels permettent généralement une mobilité dans six degrés de

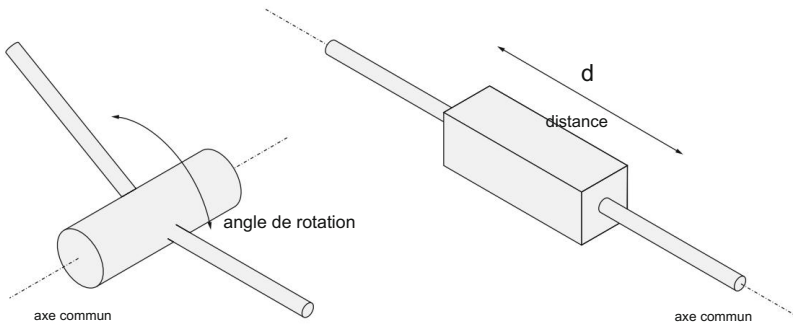


Fig. 1.3 Articulation de robot en rotation (gauche) et en translation (droite)

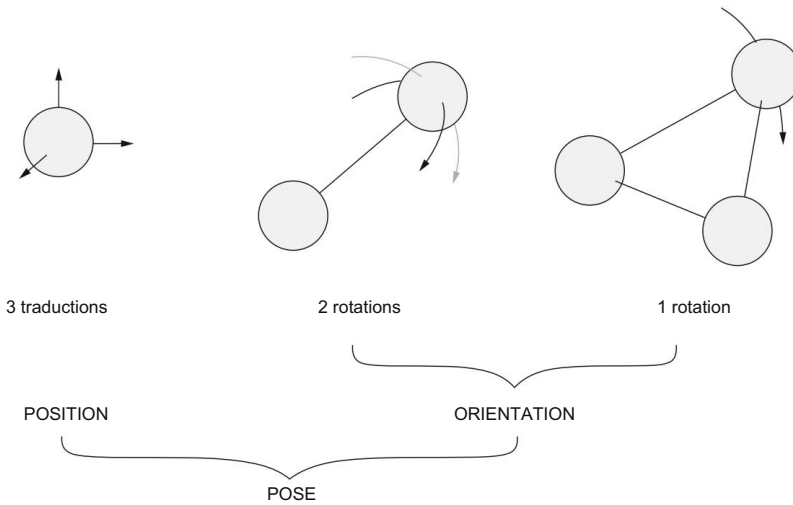


Fig. 1.4 Degrés de liberté d'un corps rigide

liberté, ce qui signifie que le mécanisme robotique a six articulations et aussi six actionneurs. De cette manière, le bras du robot peut positionner un objet à un endroit arbitraire dans l'espace de travail du robot, tandis que le préhenseur peut faire pivoter l'objet autour des trois axes d'un cadre de coordonnées rectangulaire.

Afin de clarifier le terme degré de liberté, considérons d'abord un corps rigide qui représente habituellement l'objet manipulé par le robot industriel. Le corps rigide le plus simple est constitué de trois particules de masse (Fig. 1.4). Une seule particule de masse a trois degrés de liberté, décrits par trois déplacements le long des axes d'un cadre rectangulaire. Le déplacement le long d'une ligne est appelé translation. Nous ajoutons une autre particule de masse à la première de manière à ce qu'il y ait une distance constante entre elles.

La seconde particule est limitée à se déplacer sur la surface d'une sphère entourant la première particule. Sa position sur la sphère peut être décrite par deux cercles rappelant les méridiens et les latitudes d'un globe. Le déplacement le long d'une ligne circulaire est

appelée rotation. La troisième particule de masse est ajoutée de manière à ce que les distances par rapport aux deux premières particules soient maintenues constantes. De cette façon, la troisième particule peut se déplacer le long du cercle, une sorte d'équateur, autour de l'axe déterminé par les deux premières particules. Un corps rigide a donc six degrés de liberté : trois translations et trois rotations. Les trois premiers degrés de liberté décrivent la position du corps, tandis que les trois autres degrés de liberté déterminent son orientation. Le terme pose est utilisé pour inclure à la fois la position et l'orientation. On dit souvent que si le monde qui nous entoure est en trois dimensions, le monde d'un roboticien est en six dimensions.

Les robots manipulateurs industriels modernes sont reprogrammables et polyvalents. Dans la production industrielle moderne, il n'est plus économique de détenir des stocks importants de matériaux ou de produits. C'est ce qu'on appelle : la production « juste à temps ». Par conséquent, il peut arriver que différents types d'un certain produit se retrouvent sur la même ligne de production au cours de la même journée. Ce problème, qui est le plus gênant pour les dispositifs d'automatisation fixes, peut être efficacement résolu en utilisant des manipulateurs robotiques reprogrammables dans l'industrie. Les robots reprogrammables nous permettent de passer de la production d'un type de produit à un autre type en appuyant sur un bouton poussoir. De plus, le robot manipulateur est un mécanisme polyvalent. Le mécanisme du robot est une imitation grossière du bras humain. De la même manière que nous utilisons notre bras pour des travaux précis et lourds, nous pouvons appliquer le même robot manipulateur à différentes tâches. Ceci est d'autant plus important compte tenu de la durée de vie économique d'un robot industriel, qui est plutôt longue (12 à 16 ans). Il pourrait donc arriver qu'un robot manipulateur acquis à des fins de soudage soit réaffecté à une tâche de pick and place. Les bras de robot ont une autre propriété importante, à savoir que les axes de deux articulations voisines sont soit parallèles, soit perpendiculaires. Comme le bras du robot n'a que trois degrés de liberté, il existe un nombre limité de structures possibles de bras de robot. Parmi eux, les plus utilisés sont les robots anthropomorphes et les bras robotisés SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly). Le bras de robot de type anthropomorphe (Fig. 1.5) possède les trois articulations de type rotationnel et, en tant que tel, il ressemble le plus au bras humain. Le deuxième axe d'articulation est perpendiculaire au premier, tandis que le troisième axe d'articulation est parallèle au second. L'espace de travail du bras du robot anthropomorphe, englobant tous les points pouvant être atteints par le point d'extrémité du robot, a une forme sphérique. Le bras robotique SCARA est apparu relativement tard dans le développement de la robotique industrielle (Fig. 1.6) et est principalement utilisé pour les processus d'assemblage industriels. Deux des articulations sont en rotation et une en translation. Les axes des trois articulations sont parallèles. L'espace de travail du bras robotisé SCARA est de type cylindrique. Sur le marché, nous pouvons également trouver trois autres structures de bras de robot disponibles dans le commerce : cylindrique, cartésienne et, dans une moindre mesure, sphérique.

1.2 Robotique industrielle

L'industrie d'aujourd'hui ne peut plus être imaginée sans les robots manipulateurs industriels, qui peuvent être divisés en trois groupes différents. Dans le premier groupe nous classons les robots industriels qui ont le rôle de maître dans une cellule robotisée. Une cellule robotisée généralement

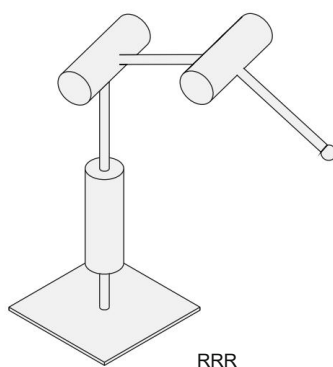


Fig. 1.5 Bras de robot anthropomorphe

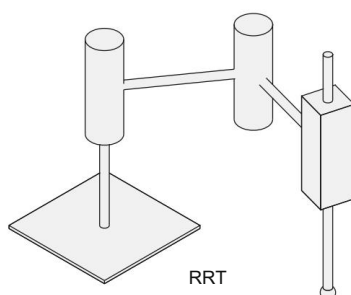


Fig. 1.6 Bras robotisé SCARA

compromet un ou plusieurs robots, postes de travail, tampons de stockage, systèmes de transport et machines à commande numérique. Dans le deuxième groupe, il y a les robots qui sont esclaves au sein de la cellule robotisée. Dans le troisième groupe, nous incluons les robots industriels qui sont utilisés dans des applications spéciales (Fig. 1.7).

Les robots maîtres dans une cellule robotisée peuvent être trouvés dans les processus de production suivants : soudage, peinture, revêtement et étanchéité, usinage et assemblage. Le soudage robotisé (point, arc, laser) représente les applications robotiques les plus fréquentes. Il se caractérise par la rapidité, la précision et l'exactitude. Le soudage robotisé est particulièrement économique lorsqu'il est effectué en trois équipes. Aujourd'hui, nous rencontrons le plus grand nombre de robots de soudage dans l'industrie automobile. Là, le rapport entre les travailleurs humains et les robots est de 6:1. Les robots industriels sont souvent utilisés dans des environnements agressifs ou dangereux, tels que la peinture au pistolet. La peinture au pistolet robotisée représente une économie de matière ainsi qu'une meilleure qualité des surfaces peintes. Lorsqu'il existe un environnement toxique, la motivation sociale pour l'introduction de robots peut l'emporter sur les facteurs économiques. Dans les applications d'usinage, le robot tient généralement une pièce ou une broche motorisée et effectue le perçage, le meulage, l'ébavurage ou d'autres applications similaires. Les robots manipulateurs pénètrent de plus en plus dans le domaine de l'assemblage industriel, où les composants sont assemblés en systèmes fonctionnels. Les industries électroniques e

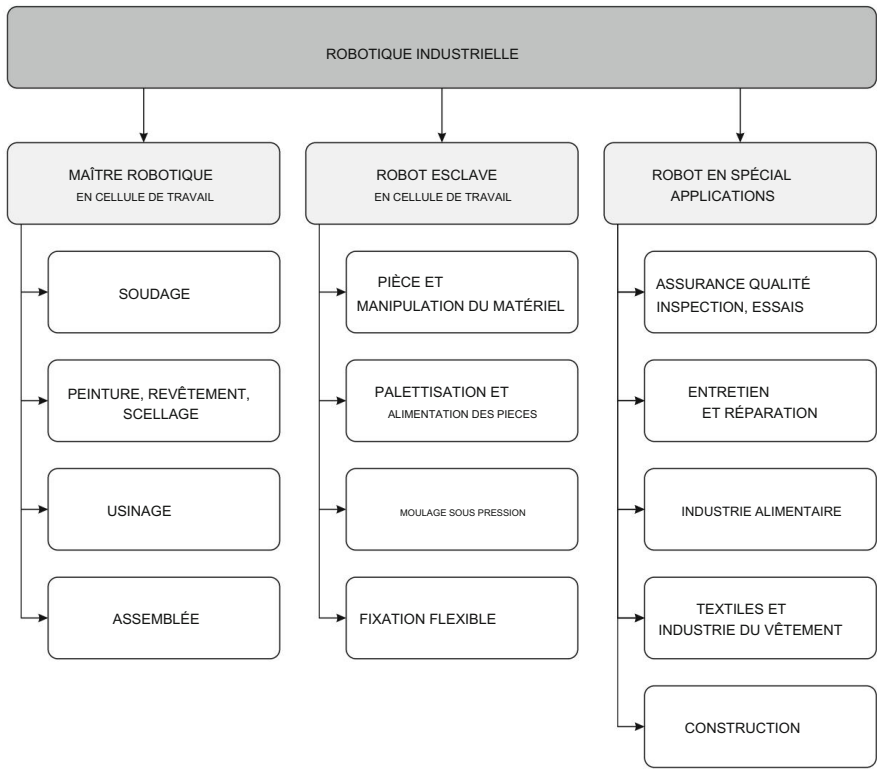


Fig. 1.7 Classification des robots industriels

un domaine important pour l'application des robots d'assemblage. Il existe également des opérations d'assemblage attrayantes dans l'industrie automobile, où un robot distribue de l'adhésif sur le pare-brise, tandis qu'un autre robot tient le pare-brise et l'insère dans l'ouverture de la carrosserie du véhicule.

Le robot joue le rôle d'esclave dans les applications industrielles suivantes : manutention de pièces et de matériaux, palettisation et alimentation de pièces, moulage sous pression et montage flexible. Dans cette situation, le rôle de maître peut être confié à une machine à commande numérique dans la cellule robotisée. Les robots pick and place représentent l'utilisation la plus courante des robots dans la manutention, où les tâches sont souvent fastidieuses ou répétitives et potentiellement dangereuses (par exemple, chargement de presse). Souvent, les robots industriels sont utilisés dans les tâches lorsqu'ils exécutent des mouvements point à point. De tels exemples se rencontrent dans la palettisation, c'est-à-dire la disposition de pièces ou de produits en vue de leur emballage ou de leur remise à une machine. La palettisation robotisée est particulièrement appropriée et bienvenue lorsqu'il s'agit d'objets lourds (par exemple des fûts dans une brasserie). Les opérations de moulage sous pression sont chaudes, sales et dangereuses, offrant un environnement désagréable pour les travailleurs humains. Avec la manipulation robotisée, les pièces moulées sous pression sont orientées avec précision dans la machine de coulée sous pression. L'efficacité d'une cellule robotisée peut être améliorée

l'utilisation de systèmes de fixation flexibles. La flexibilité d'une cellule robotisée est obtenue grâce à des positionneurs programmables asservis, permettant au processus de fabrication d'être effectué plus rapidement et avec plus de dextérité.

Les applications spéciales des robots industriels sont les suivantes : assurance qualité, inspection et test, maintenance et réparation, robots dans l'industrie alimentaire, textile et de l'habillement, et dans la construction. L'assurance qualité, l'inspection et les tests sont souvent appliqués dans l'industrie électronique, où les paramètres électriques (par exemple la tension, le courant, la résistance) sont testés lors de l'assemblage des circuits électroniques. Dans cette situation, le robot effectue les mesures nécessaires sur l'objet (dimensionnel, électrique), tout en le saisissant et en le plaçant dans une nouvelle position. Dans la maintenance et la réparation de robots, les robots téléopérés et autonomes sont utilisés pour diverses applications dans l'industrie nucléaire, les autoroutes, les chemins de fer, la maintenance des lignes électriques et l'entretien des avions. Les robots font également leur entrée dans l'industrie alimentaire, où en plus des applications de manutention et d'emballage dans la transformation des aliments, ils sont utilisés pour des tâches telles que la préparation des aliments ou encore la décoration des chocolats. L'industrie du textile et de l'habillement présente des problèmes uniques en raison de la nature molle des pièces, ce qui rend la manipulation des textiles ou des matériaux similaires extrêmement compliquée. De nombreux types de robots de construction ont été développés dans le monde entier, mais très peu ont été commercialisés.

Les principaux défis de la robotique actuelle sont l'interaction homme-robot et la collaboration homme-robot. Le développement de la robotique dite douce permet aux humains et aux robots d'interagir et de collaborer dans des environnements industriels, de service et de tous les jours. Lors du développement de robots collaboratifs, ou plus simplement de co-bots, la sécurité de l'interaction homme-robot doit être assurée. L'analyse des blessures humaines causées par des impacts d'outils contondants ou tranchants était donc nécessaire comme première étape de la recherche sur les robots collaboratifs. Sur la base de nombreuses études de collisions homme-robot, les vitesses sûres du robot ont été déterminées pour des propriétés d'inertie données du robot. Une interaction homme-robot sûre est en outre garantie par de nouveaux schémas de contrôle qui mesurent le couple dans chaque articulation du robot, détectent les moindres contacts entre le robot et l'opérateur humain et arrêtent instantanément le robot. La condition préalable à un contrôle efficace du couple est un modèle extrêmement détaillé de la dynamique du robot.

Pour rendre le robot manipulateur conforme, lorsqu'il est en contact avec un opérateur humain, une approche d'inspiration biologique est également utilisée. Le stockage de l'énergie dans les éléments à ressort dans les articulations du bras du robot rend le contrôle du mouvement efficace et naturel. Les cobots complexes, souvent appliqués en tant que systèmes robotiques à plusieurs bras, ne peuvent pas être programmés de la même manière que les robots manipulateurs industriels ordinaires. Des approches de robotique cognitive basées sur des techniques d'intelligence artificielle doivent être introduites, telles que l'apprentissage par imitation, l'apprentissage à partir de démonstrations, l'apprentissage par renforcement ou l'apprentissage à partir de récompenses. De cette manière, les co-bots sont capables d'effectuer des tâches dans des environnements inconnus et non structurés. Une attention particulière doit également être accordée aux mains du robot. En collaboration avec un opérateur humain, la main du robot doit être humanoïde afin de pouvoir actionner des outils et des équipements conçus pour la main humaine. De plus, la main du robot doit mesurer les forces exercées pour fournir une prise douce. Les robots industriels d'aujourd'hui travaillent toujours derrière les clôtures pour des raisons de sécurité. La robotique logicielle industrielle sans clôture a le potentiel d'ouvrir de nouvelles applications imprévues, conduisant à une automatisation plus flexible et plus rentable.

Chapitre 2

Matrices de transformation homogènes



2.1 Transformation translationnelle

Comme indiqué précédemment, les robots ont des articulations de translation ou de rotation. Pour décrire le degré de déplacement dans une articulation, nous avons besoin d'une description mathématique unifiée des déplacements de translation et de rotation. Le déplacement en translation d , donné par le vecteur

$$d = ai + bj + ck, \quad (2.1)$$

peut être décrit également par la matrice de transformation homogène suivante H

$$H = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Lors de l'utilisation de matrices de transformation homogènes, un vecteur arbitraire a a la forme 4×1 suivante

$$q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = xyz \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Un déplacement en translation du vecteur q pour une distance d est obtenu en multipliant le vecteur q par la matrice H

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + a \\ y + b \\ z + c \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

La translation, qui se présente par multiplication avec une matrice homogène, est équivalente à la somme des vecteurs q et d

$$v = q + d = (xi + yj + zk) + (ai + bj + ck) = (x + a)i + (y + b)j + (z + c)k. \quad (2.5)$$

Dans un exemple simple, le vecteur $1i + 2j + 3k$ est déplacé en translation sur la distance $2i - 5j + 4k$

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ -3 & 7 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Le même résultat est obtenu en additionnant les deux vecteurs.

2.2 Transformation rotationnelle

Les déplacements de rotation seront décrits dans un cadre de coordonnées rectangulaire à droite, où les rotations autour des trois axes, comme illustré à la Fig. 2.1, sont considérées comme positives. Les rotations positives autour de l'axe sélectionné sont dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsque l'on regarde depuis l'extrémité positive de l'axe vers l'origine O du cadre x - y - z . La rotation positive peut également être décrite par la règle dite de la main droite, où le pouce est dirigé le long de l'axe vers son extrémité positive, tandis que les doigts montrent la

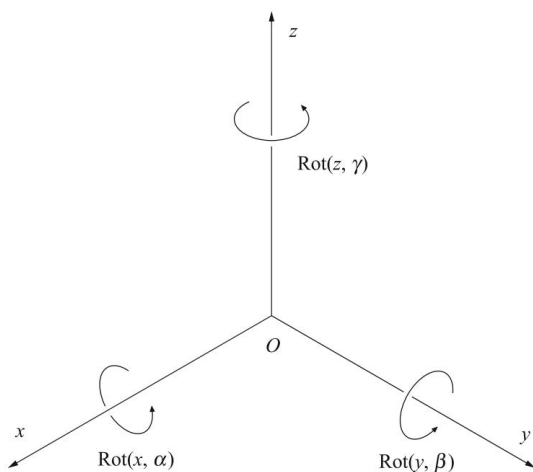


Fig. 2.1 Cadre rectangulaire droit avec rotations positives

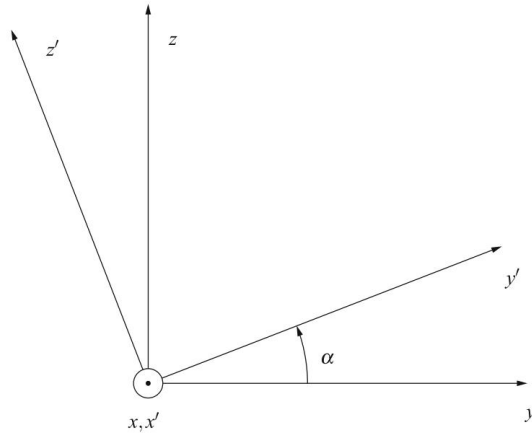


Fig. 2.2 Rotation autour de l'axe x

sens positif du déplacement de rotation. Le sens de course des athlètes dans un stade est également un exemple de rotation positive.

Examinons d'abord de plus près la rotation autour de l'axe x. La coordonnée

Le cadre $x'-y'-z'$ illustré à la Fig. 2.2 a été obtenu en faisant tourner le cadre de référence $x-y-z$ dans le sens positif autour de l'axe x pour l'angle α . Les axes x' et x sont colinéaires.

Le déplacement en rotation est également décrit par une matrice de transformation homogène. Les trois premières lignes de la matrice de transformation correspondent aux axes x , y et z du cadre de référence, tandis que les trois premières colonnes font x' , y' , et z' référence aux axes x du cadre pivoté. Les neuf éléments supérieurs gauches de la matrice H représentent la matrice de rotation 3×3 . Les éléments de la matrice de rotation sont les cosinus des angles entre les axes donnés par la colonne et la ligne correspondantes

$$\begin{aligned}
 \text{Rot}(x, \alpha) &= \begin{array}{ccc|c}
 & \begin{array}{c} x' \\ y' \\ z' \end{array} & & \\
 \begin{array}{c} x \\ y \\ z \end{array} & \begin{array}{ccc}
 \cos 0^\circ & y \cos 90^\circ & \cos 90^\circ 0 \\
 \cos 90^\circ & \cos \alpha & \cos(90^\circ + \alpha) 0 \\
 \cos 90^\circ \cos(90^\circ - \alpha) & \cos \alpha 0 & \\
 0 & 0 0 1
 \end{array} & &
 \end{array} \\
 &= \begin{array}{ccc|c}
 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\
 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

L'angle entre l'intersection y' et l'axe des x vaut 0° , donc on a $\cos 0^\circ$ dans le x du x' colonne et la ligne x . L'angle entre le x et les axes y

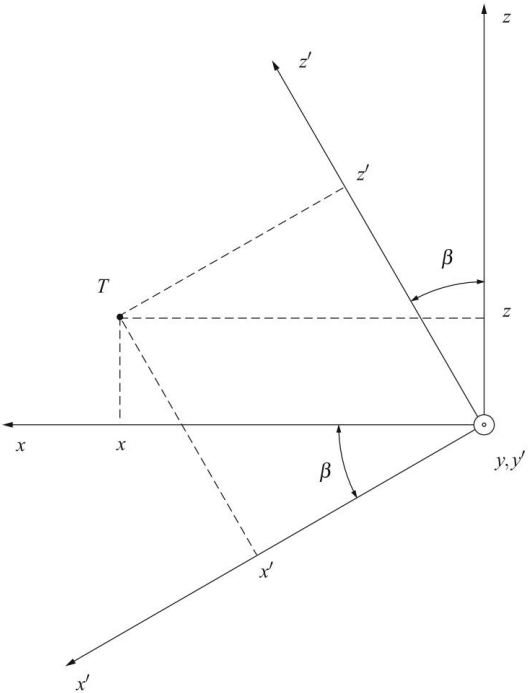


Fig. 2.3 Rotation autour de l'axe y

est $\cos 90^\circ$, on met $\cos 90^\circ$ dans l'intersection correspondante. L'angle entre le y et y' est α , l'élément de matrice correspondant est $\cos \alpha$.

Pour se familiariser avec les matrices de rotation, nous dériverons la matrice décrivant une rotation autour de l'axe y en utilisant la Fig. 2.3. Les axes colinéaires sont y et y' .

$$y = y' \tag{2.7}$$

En considérant la similitude des triangles dans la Fig. 2.3, il n'est pas difficile de dériver les deux équations suivantes

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \beta + z' \sin \beta \\ z' &= -x \sin \beta + z' \cos \beta \end{aligned} \tag{2.8}$$

Les trois équations. (2.7) et (2.8) peuvent être réécrits sous la forme matricielle

$$\text{Rot}(y, \beta) = \begin{matrix} & \begin{matrix} x' & y' & z' \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.9)$$

La rotation autour de l'axe z est décrite par la transformation homogène suivante

$$\text{Rot}(z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dans un exemple numérique simple, nous souhaitons déterminer le vecteur w , qui est obtenu en faisant tourner le vecteur $u = 14i + 6j + 0k$ de 90° dans le sens antihoraire (c'est-à-dire positif) autour de l'axe z . Comme $\cos 90^\circ = 0$ et $\sin 90^\circ = 1$, il n'est pas difficile de déterminer la matrice décrivant $\text{Rot}(z, 90^\circ)$ et de la multiplier par le vecteur u

$$w = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 14 \\ 6 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6 \\ 14 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La présentation graphique de la rotation du vecteur u autour de l'axe z est illustrée à la Fig. 2.4.

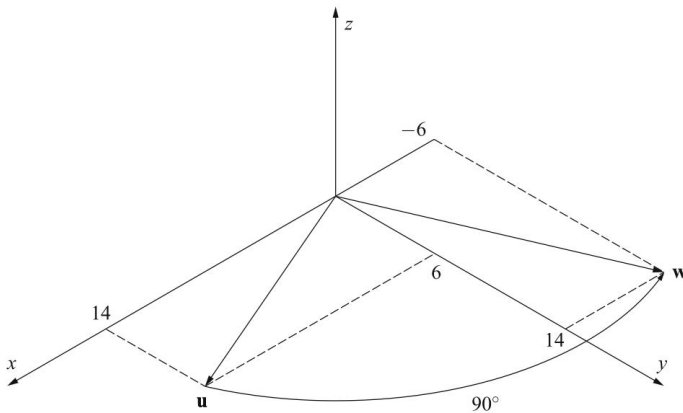


Fig. 2.4 Exemple de transformation rotationnelle

2.3 Pose et déplacement

Dans la section précédente, nous avons appris comment un point est translaté ou pivoté autour des axes du repère cartésien. Dans la suite nous nous intéresserons aux déplacements d'objets. Nous pouvons toujours attacher un cadre de coordonnées à un objet rigide considéré. Dans cette section nous traiterons de la pose et du déplacement des cadres rectangulaires. On voit ici qu'une matrice de transformation homogène décrit soit la pose d'un repère par rapport à un repère de référence, soit elle représente le déplacement d'un repère dans une nouvelle pose. Dans le premier cas, la matrice supérieure gauche 3×3 représente l'orientation de l'objet, tandis que la colonne droite 3×1 décrit sa position (par exemple, la position de son centre de masse). La dernière ligne de la matrice de transformation homogène sera toujours représentée par [0001]. Dans le cas du déplacement d'un objet, la matrice supérieure gauche correspond à la rotation et la colonne de droite correspond à la translation de l'objet. Nous allons examiner les deux cas à travers des exemples simples. Précisons d'abord la signification de la matrice de transformation homogène décrivant la pose d'un repère arbitraire par rapport au repère. Considérons le produit de matrices homogènes suivant qui donne une nouvelle matrice de transformation homogène H

$$\begin{aligned}
 H &= \text{Trans}(8, -6, 14) \text{Rot}(y, 90^\circ) \text{Rot}(z, 90^\circ) \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & -6 \\ 0 & 0 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 8 \\ 1 & 0 & 0 & -6 \\ 0 & 1 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

Lors de la définition de la matrice homogène représentant la rotation, nous avons appris que les trois premières colonnes décrivent la rotation du référentiel $x'-y'-z'$ par rapport au référentiel $x-y-z$

$$\begin{aligned}
 &\begin{matrix} x' & y' & z' \\ 0 & 0 & 1 & 8 & x \\ 1 & 0 & 0 & -6 & y \\ 0 & 1 & 0 & 14 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \end{matrix} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

La quatrième colonne représente la position de l'origine du repère $x'-y'-z'$ par rapport au repère de référence $x-y-z$. Avec cette connaissance, nous pouvons représenter graphiquement le référentiel $x'-y'-z'$ décrit par la matrice de transformation homogène (2.11), par rapport au référentiel $x-y-z$ (Fig. 2.5). L'axe des x pointe dans

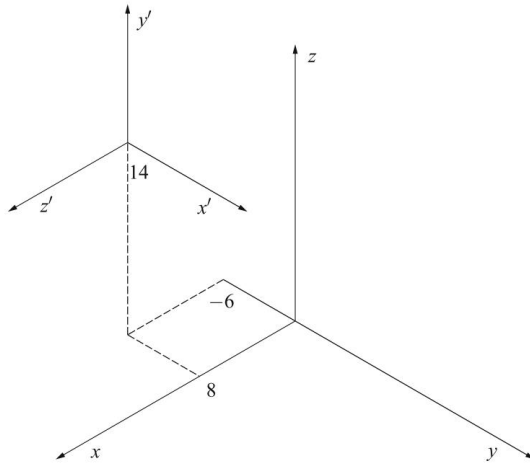


Fig. 2.5 La pose d'un référentiel arbitraire $x'-y'-z'$ par rapport au référentiel $x-y-z$

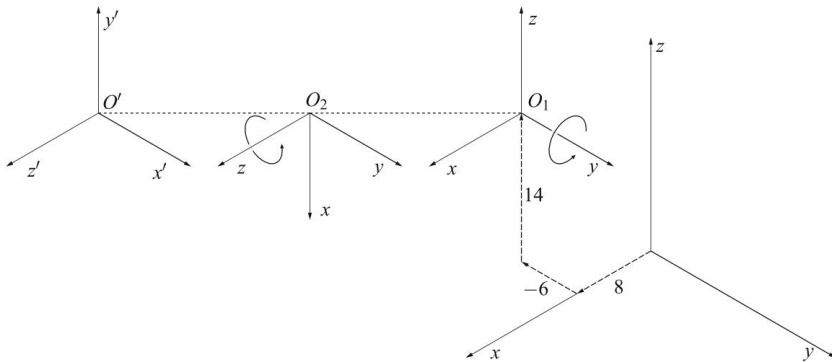


Fig. 2.6 Déplacement du référentiel dans une nouvelle pose (de droite à gauche). Les origines O_1 , O_2 et O' sont au même point

direction de l'axe y du référentiel, les y et les z . Pour l'axe est dans la direction de l'axe z , nous l'axe est dans la direction x .

convaincre de l'exactitude du référentiel dessiné à la Fig. 2.6, nous allons vérifier les déplacements inclus dans l'Eq. (2.11). Le cadre de référence est d'abord translaté au point (8, -6, 14), ensuite il est tourné de 90° autour du nouvel axe y et enfin il est tourné de 90° autour de l'axe $newestz$ (Fig. 2.6). Les trois déplacements du référentiel aboutissent à la même pose finale comme le montre la Fig. 2.5.

Dans la suite de ce chapitre, nous souhaitons élucider la deuxième signification de la matrice de transformation homogène, c'est-à-dire un déplacement d'un objet ou d'un cadre de coordonnées dans une nouvelle pose (Fig. 2.7). Tout d'abord, nous souhaitons faire pivoter le cadre de coordonnées $x-y-z$ de 90° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de l'axe z . Ceci peut être réalisé par la post-multiplication suivante de la matrice H décrivant la pose initiale du

cadre de coordonnées x-y-z

$$H1 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ). \quad (2.13)$$

Le déplacement a entraîné une nouvelle pose de l'objet et un nouveau cadre x'-y'-z' illustré à la Fig. 2.7. Nous allons déplacer ce nouveau repère de -1 le long de x' axe, 3 unités le long de y' axe et -3 le long de z' axe

$$H2 = H1 \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3). \quad (2.14)$$

Après translation une nouvelle pose de l'objet est obtenue ainsi qu'un nouveau cadre x''-y''-z''. Ce cadre sera finalement tourné de 90° autour de l'axe y dans le sens positif

$$H3 = H2 \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ). \quad (2.15)$$

Les éq. (2.13), (2.14) et (2.15) peuvent être insérés successivement l'un dans l'autre

$$H3 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3) \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ) = H \cdot D. \quad (2.16)$$

Dans l'éq. (2.16), la matrice H représente la pose initiale du cadre, H3 est la pose finale, tandis que D représente le déplacement

$$\begin{aligned} D &= \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3) \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Enfin, nous effectuerons la post-multiplication décrivant la nouvelle pose relative de l'objet

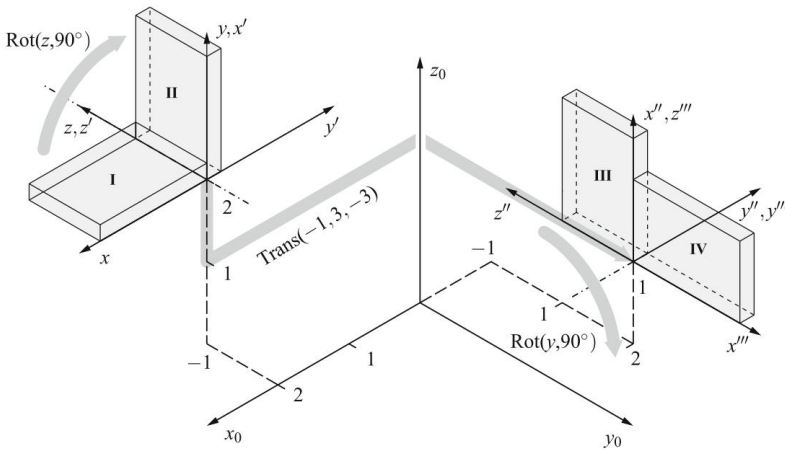


Fig. 2.7 Déplacement de l'objet dans une nouvelle pose

$$\begin{aligned}
 H_3 = H \cdot D &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -100 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} x''' & y''' & z''' \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Comme dans l'exemple précédent nous allons vérifier graphiquement l'exactitude de la matrice (2.18). Les trois déplacements du repère $x-y-z$: rotation de 90° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de l'axe z , translation de -1 le long de l'axe x , 3 unités le long de l'axe y et -3 le long de l'axe z , et rotation de 90° autour de l'axe y dans le sens positif de l'axe y_0 , y''' pointe dans la direction de l'axe x_0 et z''' pointe négatifs dans le sens positif de l'axe z_0 du référentiel. Les directions des axes du repère final correspondent aux trois premières colonnes de la matrice H_3 . Il y a aussi concordance entre la position de l'origine de la trame finale de la Fig. 2.7 et la quatrième colonne de la matrice H_3 .

2.4 Modèle géométrique du robot

Notre objectif final est le modèle géométrique d'un robot manipulateur. Un modèle géométrique de robot est donné par la description de la pose du dernier segment du robot (effecteur terminal) exprimée dans le référentiel (base). Savoir décrire le

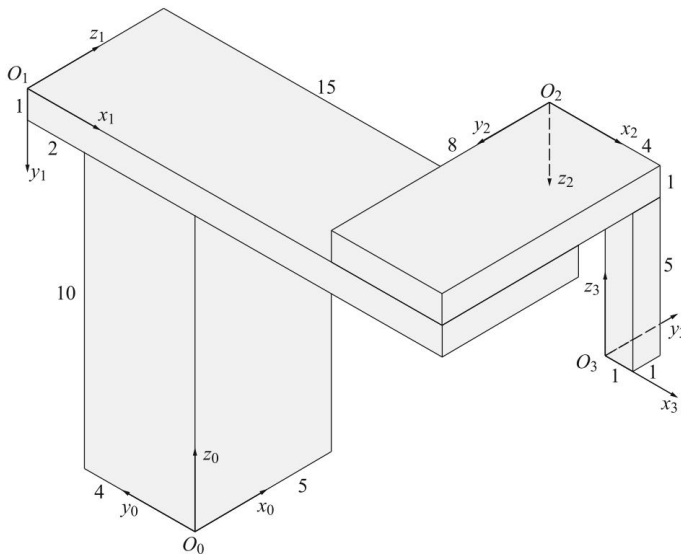


Fig. 2.8 Assemblage mécanique

La pose d'un objet à l'aide de matrices de transformation homogènes sera d'abord appliquée au processus d'assemblage. A cet effet, un ensemble mécanique composé de quatre blocs, tel que présenté à la Fig. 2.8, sera considéré. Une plaque de dimensions $(5 \times 15 \times 1)$ est placée sur un bloc $(5 \times 4 \times 10)$. Une autre plaque $(8 \times 4 \times 1)$ est positionnée perpendiculairement à la première, tenant un autre petit bloc $(1 \times 1 \times 5)$.

Un cadre est attaché à chacun des quatre blocs, comme illustré à la Fig. 2.8. Notre tâche sera de calculer la pose du référentiel x_3 - y_3 - z_3 par rapport au référentiel x_0 - y_0 - z_0 . Dans le dernier chapitre, nous avons appris que la pose d'un cadre déplacé peut être exprimée par rapport au cadre de référence en utilisant la matrice de transformation homogène H . La pose du repère x_1 - y_1 - z_1 par rapport au repère x_0 - y_0 - z_0 sera notée ${}^{0}H_1$. De même ${}^{1}H_2$ représente la pose du repère x_2 - y_2 - z_2 par rapport à x_1 - y_1 - z_1 et ${}^{2}H_3$ la pose de x_3 - y_3 - z_3 par rapport au repère x_2 - y_2 - z_2 . Nous avons appris aussi que les déplacements successifs s'expriment par des post-multiplications (multiplications successives de gauche à droite) de matrices de transformation homogènes.

Le processus d'assemblage peut être décrit par post-multiplication des matrices correspondantes. La pose du quatrième bloc peut être écrite par rapport au premier par la matrice suivante

$${}^{0}H_3 = {}^{0}H_1 {}^{1}H_2 {}^{2}H_3. \quad (2.19)$$

Les blocs étaient positionnés perpendiculairement les uns aux autres. De cette manière, il n'est pas nécessaire de calculer les sinus et cosinus des angles de rotation. Les matrices peuvent être déterminées directement à partir de la Fig. 2.8. L'axe x du cadre x_1 - y_1 - z_1 pointe dans la direction négative de l'axe y dans le cadre x_0 - y_0 - z_0 . L'axe y du cadre x_1 - y_1 - z_1 pointe dans

direction négative de l'axe z dans le cadre $x_0-y_0-z_0$. L'axe z du cadre $x_1-y_1-z_1$ a la même direction que l'axe x du cadre $x_0-y_0-z_0$. Les propriétés géométriques décrites de la structure d'assemblage sont écrites dans les trois premières colonnes de la matrice homogène. La position de l'origine de la trame $x_1-y_1-z_1$ par rapport à la trame $x_0-y_0-z_0$ est écrite dans la quatrième colonne

$${}^{0H1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} O1 \\ - & - \end{matrix} \\ & xyz \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 10 \\ -1 & 0 & 06 \\ 0 & -1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 01 \end{matrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{matrix} O0 \end{matrix} \end{matrix} \quad (2.20)$$

De la même manière, les deux autres matrices sont déterminées

$${}^{1H2} = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.21)$$

$${}^{2H3} = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.22)$$

La position et l'orientation du quatrième bloc par rapport au premier est donnée par la matrice 0H3 qui est obtenue par multiplication successive des matrices (2.20), (2.21) et (2.22)

$${}^{0H3} = \begin{matrix} 0 & 10 & 7 \\ -1 & 0 & -8 \\ 0 & 0 & 1 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.23)$$

La quatrième colonne de la matrice 0H3 $[7, -8, 6, 1]^T$ représente la position de l'origine du repère $x_3-y_3-z_3$ par rapport au repère de référence $x_0-y_0-z_0$. La précision de la quatrième colonne peut être vérifiée à partir de la Fig. 2.8. La partie rotationnelle de la matrice 0H3 représente l'orientation du référentiel $x_3-y_3-z_3$ par rapport au référentiel $x_0-y_0-z_0$.

Imaginons maintenant que la première plaque horizontale tourne par rapport au premier bloc vertical autour de l'axe 1 pour l'angle α_1 . Le deuxième plateau tourne également autour de l'axe vertical 2 selon l'angle α_2 . Le dernier bloc est allongé sur la distance d_3 le long du troisième

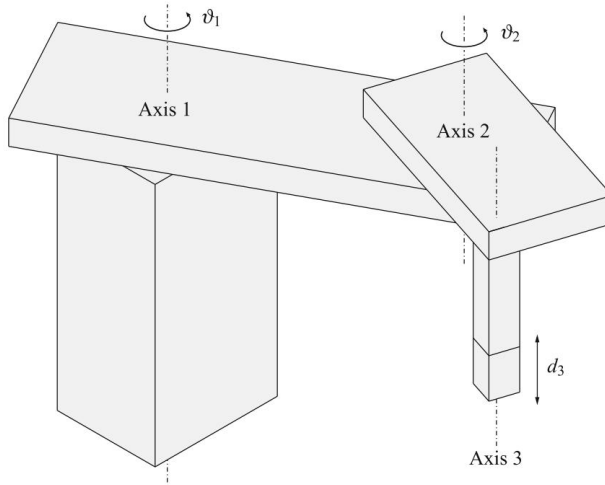


Fig. 2.9 Déplacements de l'ensemble mécanique

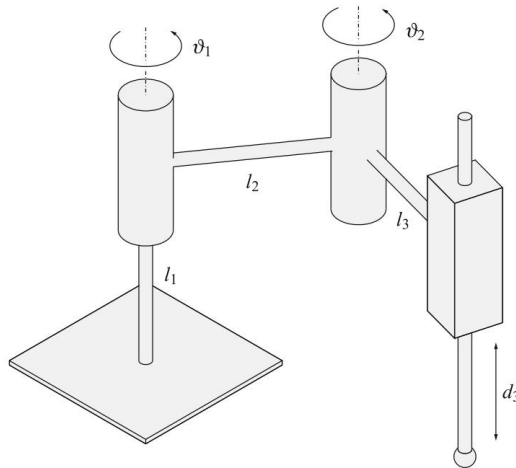


Fig. 2.10 Robot manipulateur SCARA dans une pose arbitraire

axe. Nous avons ainsi obtenu un robot manipulateur, de type SCARA comme mentionné dans le chapitre introductif.

Notre objectif est de développer un modèle géométrique du robot SCARA. Les blocs et les plaques de la Fig. 2.9 seront remplacés par des symboles pour les articulations de rotation et de translation que nous connaissons depuis l'introduction (Fig. 2.10).

Le premier segment vertical de longueur l_1 part de la base (là où le robot est fixé au sol) et se termine par la première articulation rotative. Le deuxième segment de longueur l_2 est horizontal et tourne autour du premier segment. La rotation dans la première articulation est désignée par l'angle

1. Le troisième segment de longueur l_3 est également

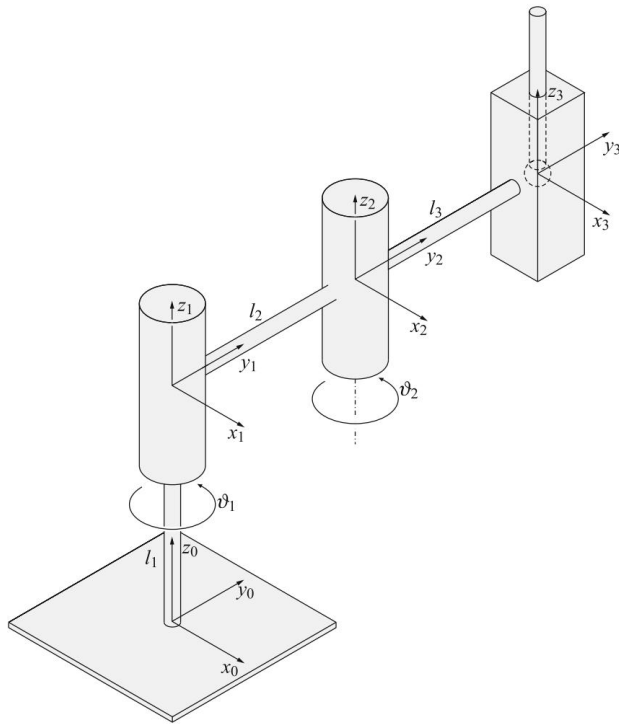


Fig. 2.11 Le robot manipulateur SCARA dans la pose initiale

horizontale et tourne autour de l'axe vertical à la fin du deuxième segment. L'angle est noté

2. Il y a une articulation de translation à la fin du troisième segment.

Il permet à l'effecteur du robot d'approcher le plan de travail où se déroule la tâche du robot. L'articulation de translation est déplacée de la longueur initiale nulle à la longueur décrite par la variable d_3 .

Le mécanisme du robot est d'abord amené à la pose initiale qui est également appelée "position d'origine". Dans la pose initiale, deux segments voisins doivent être parallèles ou perpendiculaires. Les articulations de translation sont dans leur position initiale $d_i = 0$. La pose initiale du manipulateur SCARA est illustrée à la Fig. 2.11.

Tout d'abord, les cadres de coordonnées doivent être dessinés dans le robot SCARA présenté à la Fig. 2.11. Le premier cadre de coordonnées (de référence) x_0 – y_0 – z_0 est placé sur la base du robot. Dans le dernier chapitre, nous apprendrons que les normes robotiques exigent que l'axe z_0 pointe perpendiculairement à la base. Dans ce cas, il est aligné avec le premier segment. Les deux autres axes sont sélectionnés de manière à ce que les segments du robot soient parallèles à l'un des axes du référentiel de coordonnées, lorsque le robot est dans sa position initiale de repos. Dans ce cas, nous alignons l'axe y_0 avec les segments l_2 et l_3 . Le cadre de coordonnées doit être droitier. Le reste des cadres est placé dans les articulations du robot. Les origines des cadres sont dessinées au centre de chaque joint. Un

des axes du cadre doivent être alignés avec l'axe de l'articulation. La façon la plus simple de calculer le modèle géométrique d'un robot est de rendre tous les cadres des articulations du robot parallèles au cadre de référence (Fig. 2.11).

Le modèle géométrique d'un robot décrit la pose du cadre attaché à l'effecteur par rapport au cadre de référence sur la base du robot. De même, comme dans le cas de l'assemblage mécanique, on obtiendra le modèle géométrique par multiplication successive (post-multiplication) de matrices de transformation homogènes. La principale différence entre l'ensemble mécanique et le robot manipulateur réside dans les déplacements des articulations du robot. A cet effet, chaque matrice ${}^{i-1}H_i$ décrivant la pose d'un segment sera suivie d'une matrice D_i représentant le déplacement soit de l'articulation en translation, soit en rotation. Notre robot SCARA a trois articulations. La pose du repère de fin $x_3-y_3-z_3$ par rapport au repère de base $x_0-y_0-z_0$ est exprimée par la postmultiplication suivante de trois paires de matrices de transformation homogènes

$${}^0H_3 = ({}^0H_1D_1) \cdot ({}^1H_2D_2) \cdot ({}^2H_3D_3). \quad (2.24)$$

Dans l'éq. (2.24), les matrices 0H_1 , 1H_2 et 2H_3 décrivent la pose de chaque portique de liaison par rapport au portique précédent de la même manière que dans le cas de l'assemblage des blocs. D'après la Fig. 2.11, il est évident que la matrice D_1 représente une rotation autour de l'axe z_1 positif. Le produit suivant de deux matrices décrit la pose et le déplacement dans la première articulation

$${}^0H_1D_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Dans les matrices ci-dessus, la notation plus courte suivante a été utilisée $\sin \theta = s\theta$ et $\cos \theta = c\theta$.

Dans la deuxième articulation, il y a une rotation autour de l'axe z_2

$${}^1H_2D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Dans la dernière articulation, il y a translation selon l'axe z_3

$${}^2H_3D_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Le modèle géométrique du robot manipulateur SCARA est obtenu par post-multiplication des trois matrices dérivées ci-dessus

$${}^0H_3 = \begin{pmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & -l_3s_{12} - l_2s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3c_{12} + l_2c_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Lors de la multiplication des trois matrices, l'abréviation suivante a été introduite
 $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) = c_1c_2 - s_1s_2$ et $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) = s_1c_2 + c_1s_2$.

chapitre 3

Description géométrique du robot Mécanisme



La description géométrique du mécanisme du robot est basée sur l'utilisation de matrices de transformation homogènes en translation et en rotation. Un cadre de coordonnées est attaché à la base du robot et à chaque segment du mécanisme, comme illustré à la Fig. 3.1.

Ensuite, les matrices de transformation correspondantes entre les trames consécutives sont déterminées. Un vecteur exprimé dans l'une des trames peut être transformé en une autre trame par multiplication successive de matrices de transformation intermédiaires.

Le vecteur a sur la Fig. 3.1 est exprimé par rapport au référentiel $x_3-y_3-z_3$, tandis que le vecteur b est donné dans le référentiel $x_0-y_0-z_0$ appartenant à la base du robot. Une relation mathématique entre les deux vecteurs est obtenue par la transformation homogène suivante

$$\begin{bmatrix} b \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{0H1} {}^{1H2} {}^{2H3} \begin{bmatrix} a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.1 Paramètres vectoriels d'une paire cinématique

Les paramètres vectoriels seront utilisés pour la description géométrique d'un mécanisme de robot.

Pour simplifier, nous limiterons notre étude aux mécanismes à axes d'articulation consécutifs parallèles ou perpendiculaires. De tels mécanismes sont de loin les plus fréquents en robotique industrielle.

Sur la Fig. 3.2, une paire cinématique est représentée composée de deux segments consécutifs d'un mécanisme de robot, le segment $i-1$ et le segment i . Les deux segments sont reliés par l'articulation i comprenant à la fois la translation et la rotation. La pose relative de l'articulation est déterminée par le vecteur de segment b_{i-1} et le vecteur d'articulation unitaire e_i , comme le montre la Fig. 3.2.

Le segment i peut être traduit par rapport au segment $i-1$ le long du vecteur e_i pour la distance d_i et peut être tourné autour de e_i pour l'angle θ_i . La coordonnée

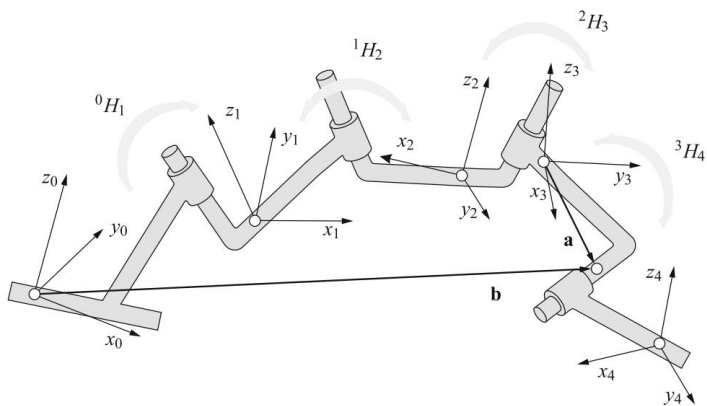


Fig. 3.1 Mécanisme du robot avec des cadres de coordonnées attachés à ses segments

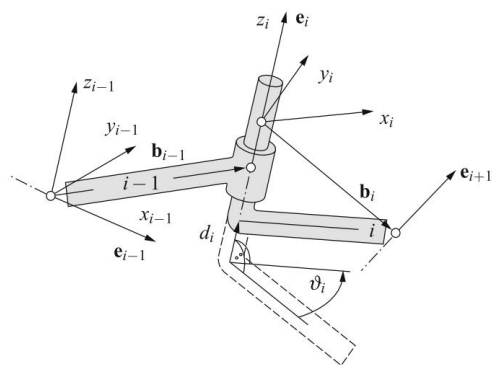


Fig. 3.2 Paramètres vectoriels d'une paire cinématique

le cadre $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ est attaché au segment i , tandis que le cadre $x_i-y_i-z_i$ appartient au segment $i + 1$.

Le repère de coordonnées $x_i-y_i-z_i$ est placé dans l'axe de l'articulation i de manière à ce qu'il soit parallèle au repère précédent $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ lorsque la paire cinématique est dans sa pose initiale (les deux variables conjointes sont nulles $\theta_i = 0$ et $d_i = 0$).

Les relations géométriques et le déplacement relatif de deux segments voisins d'un mécanisme de robot sont déterminés par les paramètres suivants :

e_i — vecteur unitaire décrivant soit l'axe de rotation soit le sens de translation dans l'articulation i et s'exprime comme l'un des axes du repère $x_i-y_i-z_i$.

Ses composantes sont les suivants

$$e_i = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{ou} & 1 & \text{ou} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} ;$$

$\mathbf{b}_{i-1}$ — vecteur segment décrivant le segment $i-1$ exprimé dans la trame $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. Ses composants sont les suivants

$$\mathbf{b}_{i-1} = \begin{pmatrix} b_{i-1,x} \\ b_{i-1,y} \\ b_{i-1,z} \end{pmatrix};$$

θ_i - variable de rotation représentant l'angle mesuré autour de l'axe e_i dans le plan perpendiculaire à e_i (l'angle est nul lorsque la paire cinématique est en position initiale) ; d_i - variable translationnelle représentant

la distance mesurée selon la direction de e_i (la distance vaut zéro lorsque la paire cinématique est en position initiale).

Si l'articulation est uniquement rotative (Fig. 3.3 ci-dessus), la variable articulaire est représentée par l'angle θ_i , tandis que $d_i = 0$. Lorsque le mécanisme du robot est dans sa position initiale, l'angle de l'articulation est égal à zéro $\theta_i = 0$ et les cadres de coordonnées $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ et $x_i-y_i-z_i$ sont parallèles. Si l'articulation est uniquement translationnelle (Fig. 3.3 ci-dessous), la variable articulaire est d_i ,

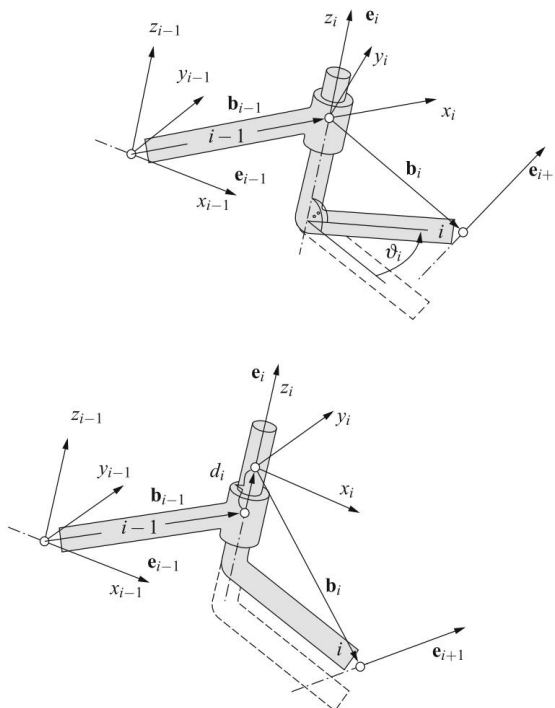


Fig. 3.3 Paramètres vectoriels d'une paire cinématique

tandis que $\theta_i = 0$. Lorsque l'articulation est dans sa position initiale, alors $d_i = 0$. Dans ce cas, les cadres de coordonnées $x_i-y_i-z_i$ et $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ sont parallèles quelle que soit la valeur de variable translationnelle d_i .

En changeant la valeur de la variable conjointe de rotation θ_i , le référentiel de coordonnées $x_i-y_i-z_i$ est tourné avec le segment i par rapport au segment précédent $i-1$ et le référentiel correspondant $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. En changeant la variable de translation d_i , le déplacement est translationnel, où seule la distance entre les deux cadres voisins change.

La transformation entre les repères de coordonnées $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ et $x_i-y_i-z_i$ est déterminée par la matrice de transformation homogène prenant l'une des trois formes possibles concernant la direction du vecteur joint e_i . Lorsque le vecteur unitaire e_i est parallèle à l'axe x_i , il y a

$${}^{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_i + b_{i-1,x} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & b_{i-1,y} & b_{i-1,z} & 1 \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

lorsque e_i est parallèle à l'axe y_i , on a la matrice de transformation suivante

$${}^{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i & b_{i-1,x} \cos \theta_i \\ 10 & d_i + b_{i-1,y} & -\sin \theta_i & 0 \\ \cos \theta_i & b_{i-1,z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Lorsque e_i est parallèle à l'axe z_i , la matrice a la forme suivante

$${}^{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & b_{i-1,x} \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & b_{i-1,y} \\ 0 & 0 & 1 & d_i + b_{i-1,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

Dans la pose initiale les repères de coordonnées $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ et $x_i-y_i-z_i$ sont parallèles ($\theta_i = 0$ et $d_i = 0$) et déplacés uniquement pour le vecteur b_{i-1}

$${}^{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_{i-1,x} \\ 0 & 1 & 0 & b_{i-1,y} \\ 0 & 0 & 1 & b_{i-1,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

3.2 Paramètres vectoriels du mécanisme

Les paramètres vectoriels d'un mécanisme de robot sont déterminés selon les quatre étapes suivantes :

- étape 1 — le mécanisme du robot est placé dans la pose initiale (de référence) souhaitée. Les axes des articulations doivent être parallèles à l'un des axes du cadre de coordonnées de référence $x_0-y_0-z_0$ attaché à la base du robot. Dans la pose de référence, toutes les valeurs des variables conjointes sont égales à zéro, $\theta_i = 0$ et $d_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$;
- étape 2 — les centres des articulations $i = 1, 2, \dots, n$ sont sélectionnés. Le centre de l'articulation i peut être n'importe où le long de l'axe de l'articulation correspondante. Un repère local de coordonnées $x_i-y_i-z_i$ est placé au centre de l'articulation de manière à ce que ses axes soient parallèles aux axes du repère de référence $x_0-y_0-z_0$. Le cadre de coordonnées local $x_i-y_i-z_i$ est déplacé avec le segment i ;
- étape 3 — le vecteur articulaire unitaire e_i est affecté à chaque axe articulaire $i = 1, 2, \dots, n$. Elle est dirigée selon l'un des axes du repère $x_i-y_i-z_i$. Dans la direction de ce vecteur la variable translationnelle d_i est mesurée, tandis que la variable rotationnelle θ_i est évaluée autour du vecteur joint e_i ;
- étape 4 — les vecteurs segments b_{i-1} sont tracés entre les origines des trames $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Le vecteur segment b_n relie l'origine de la trame $x_n-y_n-z_n$ avec le point final du robot.

Parfois, un cadre de coordonnées supplémentaire est positionné au point de référence d'un préhenseur et désigné par $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$. Il n'existe aucun degré de liberté entre les cadres $x_n-y_n-z_n$ et $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$, car les deux cadres sont attachés au même segment. La transformation entre eux est donc constante.

L'approche de la modélisation géométrique des mécanismes de robot sera illustrée par un exemple de mécanisme de robot à quatre degrés de liberté illustré à la Fig. 3.4. La pose initiale sélectionnée du mécanisme ainsi que les positions marquées des centres articulaires sont présentées à la Fig. 3.5. Les paramètres vectoriels et les variables conjointes correspondants sont rassemblés dans le tableau 3.1.

Les variables de rotation θ_1 , θ_2 et θ_4 sont mesurées dans les plans perpendiculaires aux axes d'articulation e_1 , e_2 et e_4 , tandis que la variable de translation d_3 est mesurée selon l'axe e_3 . Leurs valeurs sont nulles lorsque le mécanisme du robot est dans sa position initiale. Dans la Fig. 3.6, le robot manipulateur est représenté dans une pose où les quatre variables sont positives et non nulles. La variable θ_1 représente l'angle entre l'axe initial et momentané y_1 , la variable θ_2 l'angle entre l'axe initial et momentané z_2 , la variable d_3 est la distance entre la position initiale et réelle de l'axe x_3 , tandis que θ_4 représente l'angle entre axe x_4 initial et momentané.

Les paramètres vectoriels sélectionnés du mécanisme du robot sont insérés dans les matrices de transformation homogènes (3.2)–(3.4)

$${}^{0H_1} = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

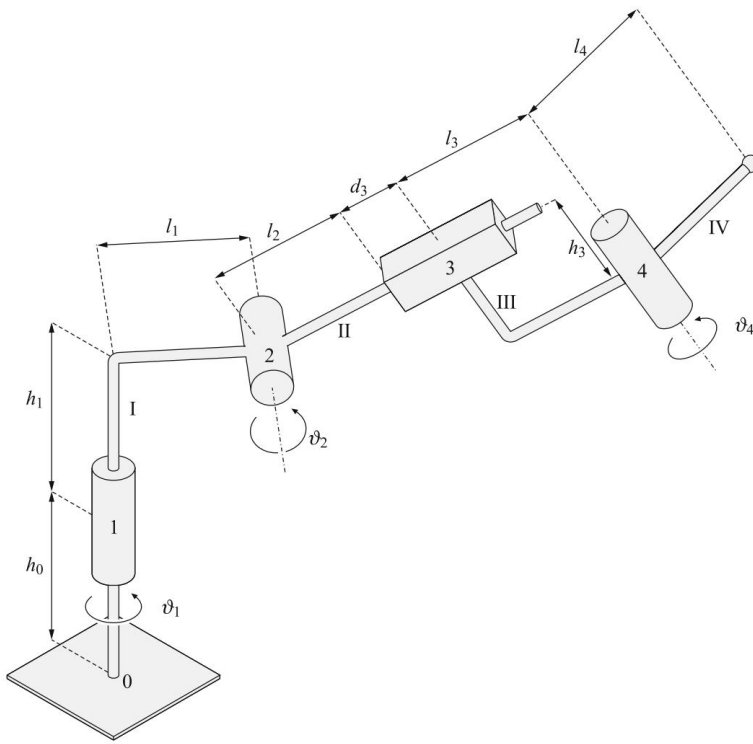


Fig. 3.4 Mécanisme du robot à quatre degrés de liberté

$${}^1H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -s_2 & l_1 \\ 0 & s_2 & c_2 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 + l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3H_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & -h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

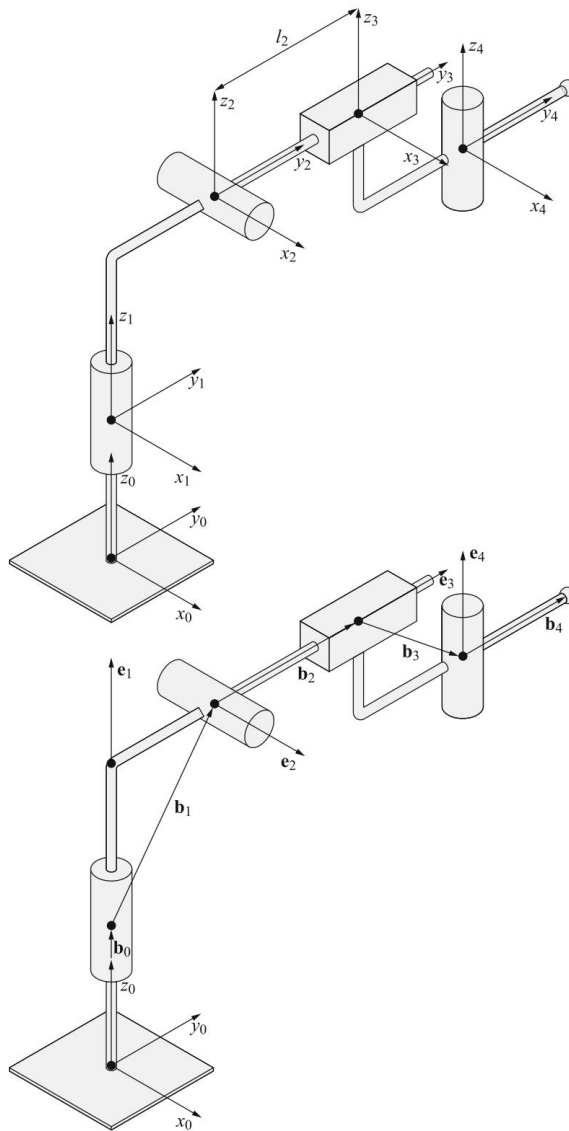


Fig. 3.5 Positionnement des cadres de coordonnées pour le mécanisme du robot à quatre degrés de liberté

Une matrice homogène supplémentaire décrit la position de la référence du préhenseur point où le cadre de coordonnées x_5 – y_5 – z_5 peut être attribué

$${}^4H_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tableau 3.1 Paramètres vectoriels et variables articulaires pour le mécanisme du robot de la Fig. 3.5

je 1234					
i	1	2	0	4	
di	0	0	d3	0	
je 1234					
	0	1	0	0	
ie	0	0	1	0	
	1	0	0	1	
je 12345					
	0	0	0	0	
bi-1	0	l1	l2	l3	l4
	0	-h3	0	h0	h1

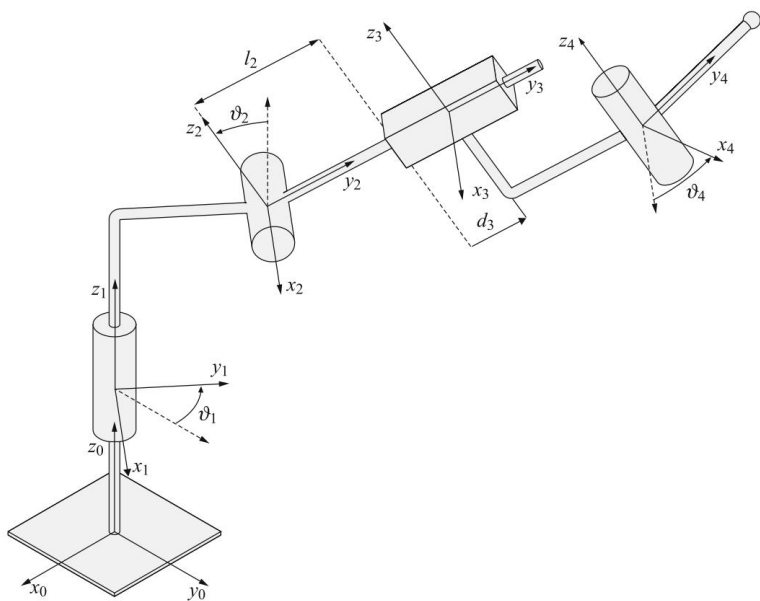


Fig. 3.6 Détermination des variables de rotation et de translation pour le mécanisme du robot à quatre degrés de liberté

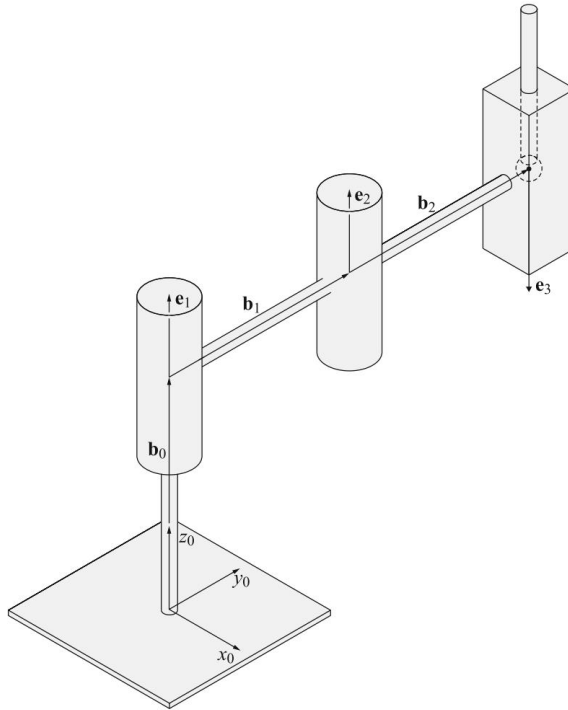


Fig. 3.7 Le robot manipulateur SCARA dans la pose initiale

Cette dernière matrice est constante car les repères x_4 – y_4 – z_4 et x_5 – y_5 – z_5 sont parallèles et décalés de la distance l_4 . Habituellement, ce cadre supplémentaire n'est même pas fixé au mécanisme du robot, car la position et l'orientation de la pince peuvent être décrites dans le cadre x_4 – y_4 – z_4 .

Lors de la détermination de la pose initiale (d'origine) du mécanisme du robot, nous devons veiller à ce que les axes des articulations soient parallèles à l'un des axes du cadre de coordonnées de référence. La pose initiale doit être choisie de manière à ce qu'elle soit simple et facile à examiner, qu'elle corresponde bien aux tâches anticipées du robot et qu'elle minimise le nombre d'opérations mathématiques requises incluses dans les matrices de transformation.

Comme autre exemple, nous considérerons le robot manipulateur SCARA dont le modèle géométrique a déjà été développé dans le chapitre précédent et est illustré à la Fig. 2.10.

Le mécanisme du robot doit d'abord être positionné dans la pose initiale de manière à ce que les axes des articulations soient parallèles à l'un des axes du cadre de référence x_0 – y_0 – z_0 .

De cette manière, les deux segments voisins sont soit parallèles, soit perpendiculaires. L'articulation de translation doit être dans sa position initiale ($d_3 = 0$). Le robot SCARA dans la pose initiale sélectionnée est illustré à la Fig. 3.7.

Les cadres de coordonnées joints x_i – y_i – z_i sont tous parallèles au cadre de référence. Par conséquent, nous ne dessinerons que le cadre de référence et ferons en sorte que les points indiquent les centres articulaires. Au centre des deux joints de rotation, les vecteurs unitaires e_1 et e_2 sont placés

Tableau 3.2 Paramètres vectoriels et variables articulaires pour le robot manipulateur SCARA

je 1234				
i	1	2	0	4
di	0	0	d3	0
je 1234				
	0	1	0	0
ie	0	0	1	0
	1	0	0	1
1 2 3 4 5				
	0	0	0	0
bi-1	0	I1	I2	I3
	0	-h3	0	0

le long des axes articulaires. La rotation autour du vecteur e1 est décrite par la variable 1, tandis que 2 représente l'angle autour du vecteur e2 . Le vecteur e3 est placé selon l'axe de translation de la troisième articulation. Sa variable de traduction est décrite par d3. La première articulation est reliée à la base du robot par le vecteur b0. Le vecteur b1 relie la première et la deuxième articulation et le vecteur b2 la deuxième et la troisième articulation. Les variables et les vecteurs sont regroupés dans les trois tableaux (tableau 3.2).

Dans notre cas tous les vecteurs ei sont parallèles à l'axe z0 , les matrices de transformation homogènes s'écrivent donc selon Eq. (3.4). Des matrices similaires sont obtenues pour les deux joints de rotation.

$${}^0H_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1H_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour l'articulation de translation, $d_3 = 0$ doit être inséré dans l'Eq. (3.4), donnant

$${}^2H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Avec la postmultiplication des trois matrices, le modèle géométrique du robot SCARA est obtenu

$${}^0H_3 = {}^0H_1 {}^1H_2 {}^2H_3 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & -l_3 s_{12} - l_2 s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3 c_{12} + l_2 c_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Nous avons obtenu le même résultat qu'au chapitre précédent, mais de manière beaucoup plus simple et plus claire.

Chapitre 4

Orientation



Nous décrivons souvent notre environnement comme un monde en trois dimensions. Le monde du roboticien est cependant en six dimensions. Il doit non seulement considérer la position d'un objet, mais aussi son orientation. Lorsqu'un préhenseur ou un effecteur de robot s'approche d'un objet à saisir, les angles d'espacement entre le préhenseur et l'objet sont de la plus haute importance.

Six paramètres sont nécessaires pour décrire complètement la position et l'orientation d'un objet dans un espace. Trois paramètres font référence à la position et les trois autres à l'orientation de l'objet. Il existe trois manières possibles de décrire mathématiquement l'orientation de l'objet. La première possibilité est une matrice de rotation/orientation composée de neuf éléments. La matrice représente une description redondante de l'orientation. Une description non redondante est donnée par les angles RPY ou Euler. Dans les deux cas, nous avons trois angles. Les angles RPY sont définis autour des axes d'un cadre de coordonnées fixe, tandis que les angles d'Euler décrivent l'orientation autour d'un cadre de coordonnées relatives. La troisième description possible de l'orientation est rendue possible par quatre paramètres de quaternion.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes déjà familiarisés avec les matrices de rotation autour des axes x , y et z d'un cadre rectangulaire. Nous les avons trouvés utiles lors du développement du modèle géométrique d'un mécanisme de robot. Il n'est pas difficile de comprendre qu'il existe aussi une matrice décrivant la rotation autour d'un axe arbitraire. Ceci peut être exprimé sous la forme suivante

$${}^{0R1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La matrice de dimension 3×3 ne représente pas seulement la rotation, mais aussi l'orientation du cadre $x_1-y_1-z_1$ par rapport au cadre $x_0-y_0-z_0$, comme on peut le voir sur la Fig. 4.1. Le référentiel $x_0-y_0-z_0$ est décrit par les vecteurs unitaires

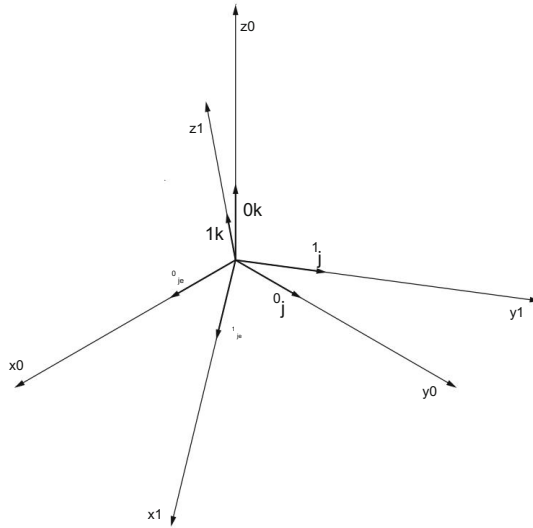


Fig. 4.1 Orientation du référentiel $x_1-y_1-z_1$ par rapport au référentiel de référence $x_0-y_0-z_0$

0j , 0j , et $0k$ et le cadre pivoté $x_1-y_1-z_1$ avec les vecteurs unitaires j , et $1k$. 1j , 1
 Les deux cadres de coordonnées coïncident dans la même origine. S'agissant des vecteurs unitaires, les éléments de la matrice de rotation/orientation sont simplement les cosinus des angles appartenant à chaque paire d'axes.

Considérons l'exemple de la Fig. 4.2 et calculons la matrice représentant l'orientation du cadre $x_1-y_1-z_1$, qui est tourné de l'angle $+$ par rapport au cadre $x_0-y_0-z_0$.

Nous avons affaire aux produits non nuls suivants des vecteurs unitaires

$$\begin{aligned}
 {}^0j \cdot {}^1j &= 1, \\
 {}^0j \cdot {}^1k &= \cos \theta, \\
 0k \cdot 1k &= \cos \theta, \\
 {}^0j \cdot 1k &= -\sin \theta, \\
 0k \cdot {}^1j &= \sin \theta.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

La matrice décrivant l'orientation du repère $x_1-y_1-z_1$ par rapport à $x_0-y_0-z_0$ est donc

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & -s \\ 0 & s & c \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

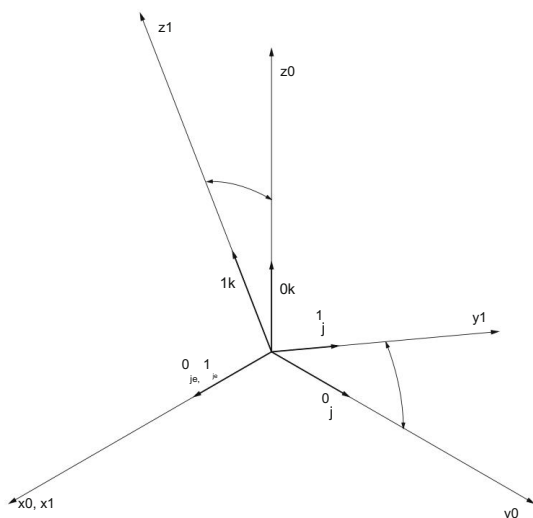
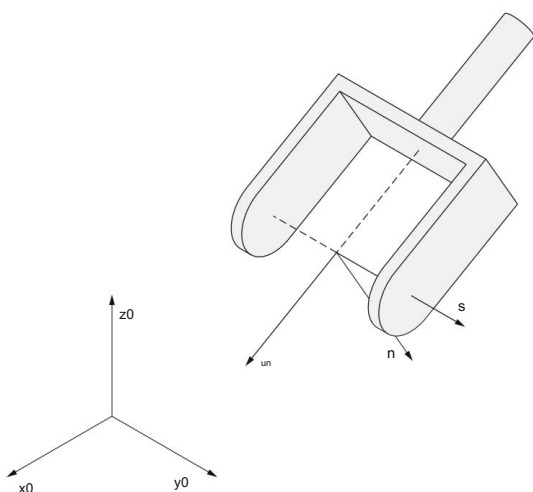
Fig. 4.2 Deux cadres de coordonnées pivotés autour de l'axe x_0 

Fig. 4.3 Orientation du préhenseur du robot

La matrice (4.3) peut également être interprétée comme la matrice de rotation autour de l'axe x que nous connaissons déjà dans le cadre de la matrice homogène (2.6) du deuxième chapitre.

La notion d'orientation est en robotique principalement liée à l'orientation du préhenseur du robot. Un cadre de coordonnées avec trois vecteurs unitaires n , s et a , décrivant l'orientation du préhenseur, est placé entre deux doigts d'un préhenseur robot simple (Fig. 4.3).

Le vecteur de l'axe z se trouve dans la direction de l'approche du préhenseur vers l'objet. Il est donc noté vecteur a (approche). Le vecteur, qui est aligné avec l'axe y, décrit la direction de glissement des doigts et est noté s (glissière). Le troisième vecteur complète le cadre de coordonnées droitier et est appelé normal. Cela peut être représenté par $n = s \times a$. La matrice décrivant l'orientation du préhenseur par rapport au référentiel x0-y0-z0 a la forme suivante

$$R = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

L'élément n_x de la matrice (4.3) désigne la projection du vecteur unitaire n sur l'axe x0 du référentiel. Il est égal au cosinus de l'angle entre les axes i de la matrice des éléments (4.1). Il en est de même pour les huit autres éléments de la matrice d'orientation R (4.3).

Pour décrire l'orientation d'un objet, nous n'avons pas besoin de neuf éléments de la matrice. Le vecteur colonne de gauche est le produit croisé des vecteurs s et a. Les vecteurs s et a sont des vecteurs unitaires perpendiculaires l'un à l'autre, de sorte que nous avons

$$\begin{aligned} s \cdot s &= 1, \\ a \cdot a &= 1, \\ s \cdot a &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Trois éléments suffisent donc à décrire l'orientation. Cette orientation est souvent décrit par la séquence de rotations suivante

R - roulis - autour de l'axe z, P - tangage - autour de l'axe y, Y - lacet - autour de l'axe x.

Cette description est principalement utilisée pour décrire l'orientation d'un navire ou d'un avion. Imaginons que l'avion vole le long de l'axe z et que le cadre de coordonnées soit positionné au centre de l'avion. Ensuite, R représente la rotation autour de l'axe z, P fait référence à la rotation autour de l'axe y et Y à la rotation ψ autour de l'axe x, comme le montre la figure 4.4.

L'utilisation des angles RPY pour un préhenseur de robot est illustrée à la Fig. 4.5. Comme on peut s'en rendre compte à partir des Figs. 4.4 et 4.5, l'orientation RPY est définie par rapport à un référentiel fixe. Lors du développement du modèle géométrique du robot manipulateur SCARA dans le deuxième chapitre, nous avons postmultiplié les matrices de transformation homogènes décrivant la rotation (ou la translation) de chaque articulation particulière. La position et l'orientation de chaque cadre de joint ont été définies par rapport au cadre précédent, appartenant à l'axe de joint qui n'est pas fixe. Dans ce cas, comme

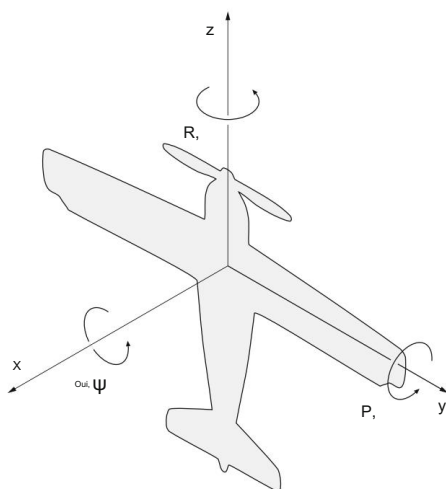


Fig. 4.4 Angles RPY pour le cas d'un avion

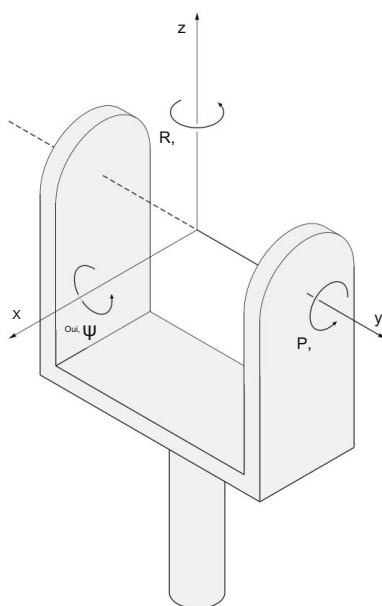


Fig. 4.5 Angles RPY pour le cas d'un préhenseur robot

nous l'avons vu, nous multiplions les matrices de gauche à droite. Quand on a affaire avec des rotations consécutives autour des axes du même repère de coordonnées, on utilise de la prémultiplication des matrices de rotation. Autrement dit, les multiplications sont exécutés dans l'ordre inverse de droite à gauche.

Nous commençons par la rotation autour de l'axe z , continuons avec la rotation autour de l'axe y et terminons par la rotation ψ autour de l'axe x . L'ordre inverse des rotations ressort également de la dénomination des angles RPY. La matrice d'orientation, qui appartient aux angles RPY, est obtenue par la multiplication suivante des matrices de rotation

$$\begin{aligned}
 R(\alpha, \beta, \psi) &= \text{Rot}(z, \alpha) \text{Rot}(y, \beta) \text{Rot}(x, \psi) = \\
 &= \begin{pmatrix} c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ -s & 0 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} c & c & c & s & s\psi - s & c\psi & c & s & c\psi + s & s\psi \\ s & s & s & s & s\psi + c & c\psi & s & s & c\psi - c & c\psi \\ -s & c & c\psi & c & s\psi \end{pmatrix} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

L'équation (4.6) calcule la matrice de rotation à partir des angles RPY correspondants.

Nous avons appris que la rotation et l'orientation peuvent être décrites soit par des matrices de rotation, soit par des angles RPY. Dans le premier cas, nous avons besoin de 9 paramètres, alors que seuls 3 paramètres sont nécessaires dans le dernier cas. Bien que les matrices soient pratiques pour les calculs, elles ne fournissent cependant pas une image rapide et claire, par exemple, de l'orientation d'un préhenseur de robot dans un espace. Les angles RPY et Euler présentent bien l'orientation d'un préhenseur, mais ils ne conviennent pas aux calculs. Dans ce chapitre, nous apprendrons que les quaternions sont appropriés pour le calcul ou la description de l'orientation.

Les quaternions représentent l'extension des nombres complexes

$$z = a + ib, \quad (4.7)$$

où i signifie la racine carrée de -1 , donc $i^2 = -1$. Les nombres complexes peuvent être représentés géométriquement dans un plan en introduisant un cadre rectangulaire avec des axes e (réel) et m (imaginaire). Lors du passage du plan à l'espace, deux vecteurs unitaires j et k doivent être ajoutés à i déjà existant. L'égalité suivante $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ est également valide. Le quaternion a la forme suivante

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k. \quad (4.8)$$

Dans l'éq. (4.8) q_i sont des nombres réels, tandis que i, j et k correspondent aux vecteurs unitaires le long des axes du cadre de coordonnées rectangulaires.

Lors de la description de l'orientation par les angles RPY, les multiplications des matrices de rotation étaient nécessaires. De la même manière, nous devons multiplier les quaternions

$$pq = (p_0 + p_1i + p_2j + p_3k)(q_0 + q_1i + q_2j + q_3k). \quad (4.9)$$

Tableau 4.1 Règles pour les multiplications de quaternions

*	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	-j
j	j	-k	-1	i
k	k	j	-i	-1

La multiplication des quaternions n'est pas commutative. Lors de la multiplication de deux quaternions, nous utiliserons le tableau 4.1. Multiplions deux quaternions

$$\begin{aligned} &(2 + 3i - j + 5k)(3 - 4i + 2j + k) = \\ &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\ &2 - 8i - 12j + 4ji - 20ki + \\ &+ 4j + 6ij - 2j^2 + 10kj + \\ &+ 2k + 3ik - jk + 5k^2 = \\ &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\ &- 8i + 12 - 4k - 20j + \\ &+ 4j + 6k + 2 - 10i + \\ &+ 2k - 3j - jk - 5 = \\ &= 15 - 10i - 22j + 19k. \end{aligned}$$

(4.10)

L'expression suivante d'un quaternion est particulièrement appropriée pour décrire le orientation dans l'espace

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \hat{u}$$

(4.11)

Dans l'éq. (4.11) $\hat{u}$ est un vecteur unitaire aligné avec l'axe de rotation, tandis que θ est l'angle de rotation. Le quaternion d'orientation peut être obtenu à partir des angles RPY. Rotation R est décrit par le quaternion

$$q_R = \cos \frac{\theta_R}{2} + \sin \frac{\theta_R}{2} \hat{u}_R$$

(4.12)

Le quaternion suivant appartient à la rotation P

$$q_P = \cos \frac{\theta_P}{2} + \sin \frac{\theta_P}{2} \hat{u}_P$$

(4.13)

tandis que la rotation Y peut s'écrire comme suit

$$\frac{\psi}{2} \sin \psi = \cos \psi \tag{4.14}$$

Après avoir multiplié les trois quaternions ci-dessus (4.12-4.14), l'orientation résultant quaternion est obtenu

$$q(\phi, \theta, \psi) = q_z q_y q_x \tag{4.15}$$

Illustrons les trois descriptions de l'orientation, c'est-à-dire les angles RPY, la matrice de rotation et les quaternions, par un exemple de description de l'orientation du préhenseur. Pour rendre l'exemple clair et simple, le plan de la pince à deux doigts sera placé dans le plan x0-y0 du référentiel (Fig. 4.6). Les angles RPY peuvent être lus sur la Fig. 4.6. Les rotations autour des axes z et y sont égales à zéro. La rotation de -60° autour de l'axe x peut être vue sur la Fig. 4.6. L'orientation de la pince peut donc être décrite par l'ensemble suivant d'angles RPY

$$\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \psi = -60^\circ \tag{4.16}$$

Sur la Fig. 4.6, nous pouvons également lire les angles entre les axes du cadre de coordonnées de référence et de la pince. Leurs cosinus représentent la matrice orientation/rotation R

$$\begin{aligned} n_x &= \cos 0^\circ, s_x = \cos 90^\circ, a_x = \cos 90^\circ \\ n_y &= \cos 90^\circ, s_y = \cos 60^\circ, a_y = \cos 30^\circ \\ n_z &= \cos 0^\circ, s_z = \cos 150^\circ, a_z = \cos 60^\circ \end{aligned} \tag{4.17}$$

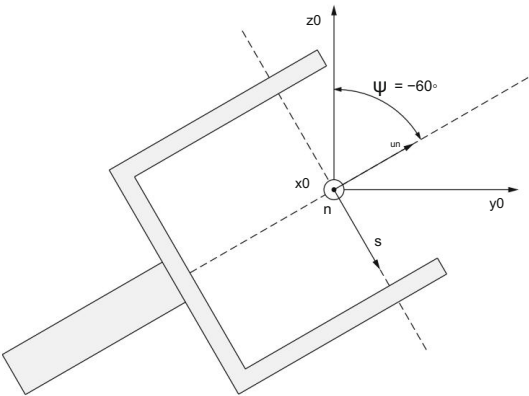


Fig. 4.6 Orientation du préhenseur du robot

La matrice R peut également être calculée en insérant les angles RPY connus dans l'équation. (4.6)

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,866 \\ 0 & -0,866 & 0,5 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

De cette manière, l'exactitude de notre lecture des angles de la Fig. 4.6 a été testée. Nous calculerons le quaternion d'orientation en insérant les angles RPY dans les équations. (4.12–4.14)

$$\begin{aligned} q_z &= 1 + 0k, \\ q_y &= 1 + 0j, \\ q_x &= 0,866 - 0,5i. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Le quaternion d'orientation est obtenu après multiplication des trois quaternions ci-dessus (4.15)

$$q_0 = 0,866, q_1 = -0,5, q_2 = 0, q_3 = 0. \quad (4.20)$$

Les éq. (4.16), (4.18) et (4.20) montrent trois descriptions différentes de la même orientation de la pince.

Chapitre 5

Robot manipulateur à deux segments



5.1 Cinématique

La cinématique fait partie de la mécanique classique qui étudie le mouvement sans tenir compte des forces responsables de ce mouvement. Le mouvement est en général décrit par des trajectoires, des vitesses et des accélérations. En robotique, nous nous intéressons principalement aux trajectoires et aux vitesses, car les deux peuvent être mesurées par les capteurs articulaires. Dans les articulations de robot, les trajectoires sont mesurées soit comme l'angle dans une articulation de rotation, soit comme la distance dans une articulation de translation. Les variables conjointes sont également appelées coordonnées internes. Lors de la planification et de la programmation d'une tâche de robot, la trajectoire du point final du robot est de la plus haute importance. La position et l'orientation de l'effecteur terminal sont décrites par des coordonnées externes. Le calcul des variables externes à partir des variables internes, et inversement, est le problème central de la cinématique des robots.

Dans ce chapitre, nous limiterons notre intérêt à un robot manipulateur planaire à deux segments avec deux articulations en rotation (Fig. 5.1). Selon la définition donnée dans le chapitre introductif, un tel mécanisme peut difficilement être qualifié de robot. Néanmoins, ce mécanisme est une partie importante des structures des robots SCARA et anthropomorphes et nous permettra d'étudier plusieurs propriétés caractéristiques du mouvement des mécanismes des robots.

Il existe une distinction entre la cinématique directe et inverse. Cinématique directe dans le cas d'un robot à deux segments représente le calcul de la position du point final du robot à partir des angles d'articulation connus. La cinématique inverse calcule les variables articulaires à partir de la position connue du point final du robot. La cinématique directe représente le problème le plus simple, car nous avons une solution unique pour la position du point final du robot. Les solutions de la cinématique inverse dépendent largement de la structure du robot manipulateur. On a souvent affaire à plusieurs solutions pour les variables articulaires aboutissant à la même position du point final du robot, alors que dans certains cas une solution analytique de la cinématique inverse n'existe pas.

L'analyse cinématique inclut également les relations entre la vitesse du point final du robot et les vitesses des articulations individuelles. Nous verrons que la cinématique inverse pour les vitesses est plus simple que la cinématique inverse pour les trajectoires. Nous trouverons d'abord les

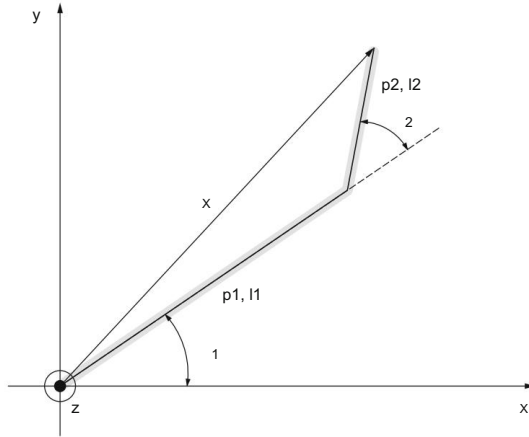


Fig. 5.1 Robot manipulateur planaire à deux segments

solution de cinématique directe pour les trajectoires. Par différenciation on obtient alors les équations décrivant la cinématique directe des vitesses. Par simple inversion de matrice, la cinématique inverse des vitesses peut être calculée. Considérons maintenant le robot manipulateur planaire à deux segments illustré à la Fig. 5.1.

L'axe de rotation de la première articulation est représenté par l'axe vertical z pointant hors de l'avion. Le vecteur p_1 est dirigé le long du premier segment

$$p_1 = l_1 \begin{pmatrix} \cos 1 \\ \sin 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Le vecteur p_2 est accompagné du deuxième segment. Ses composantes peuvent être lues sur la Fig. 5.1

$$p_2 = l_2 \begin{pmatrix} \cos(1 + 2) \\ \sin(1 + 2) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Le vecteur x relie l'origine du cadre de coordonnées au point final du robot

$$x = p_1 + p_2. \quad (5.3)$$

Nous avons donc pour la position du point final du robot

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos 1 + l_2 \cos(1 + 2) \\ l_1 \sin 1 + l_2 \sin(1 + 2) \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

En définissant le vecteur des angles articulaires

$$q = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}^J, \quad (5.5)$$

l'éq. (5.4) peut être écrit sous la forme abrégée suivante

$$\mathbf{x} = \mathbf{k}(\mathbf{q}), \quad (5.6)$$

où $\mathbf{k}(\cdot)$ représente les équations de la cinématique directe.

La relation entre les vitesses du point final du robot et les vitesses des articulations est obtenu par différenciation. Les coordonnées du point final sont des fonctions de la angles articulaires, qui à leur tour sont des fonctions du temps

$$\begin{aligned} x &= x_1(t), \quad x_2(t) \\ y &= y_1(t), \quad y_2(t). \end{aligned} \quad (5.7)$$

En calculant les dérivées temporelles de l'Eq. (5.7) et en les arrangeant sous forme de matrice, nous pouvons écrire

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Pour notre robot manipulateur à deux segments, nous obtenons l'expression suivante

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

La matrice, qui est dans notre cas du second ordre, est appelée la matrice jacobienne $\mathbf{J}(\mathbf{q})$. La relation (5.9) peut s'écrire sous la forme abrégée

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad (5.10)$$

De cette manière, les problèmes de cinématique directe pour les trajectoires et les vitesses sont résolus. Lors de la résolution de la cinématique inverse, nous calculons les angles des articulations à partir des position du point final du robot. La figure 5.2 montre uniquement les paramètres du mécanisme du robot à deux segments qui sont pertinents pour le calcul de l'angle θ_2 . La règle du cosinus est utilisée

$$x_2^2 + y_2^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180^\circ - \theta_2), \quad (5.11)$$

où $-\cos(180^\circ - \theta_2) = \cos(\theta_2)$. L'angle du deuxième segment du manipulateur à deux segments est calculé comme la fonction trigonométrique inverse

$$\theta_2 = \arccos \frac{x_2^2 + y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}. \quad (5.12)$$

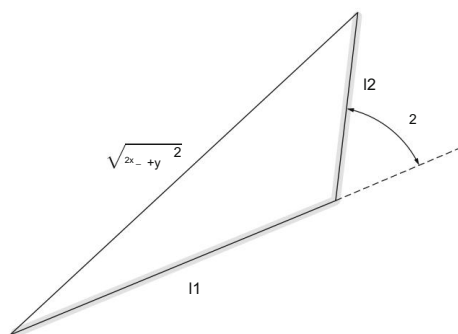


Fig. 5.2 Calcul de l'angle 2

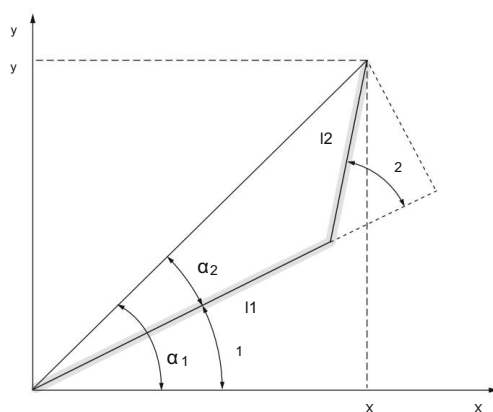


Fig. 5.3 Calcul de l'angle 1

L'angle du premier segment est calculé à l'aide de la Fig. 5.3. Il est obtenu comme la différence des angles α_1 et α_2

$$1 = \alpha_1 - \alpha_2.$$

L'angle α_1 est obtenu à partir du triangle rectangle composé de x horizontal et coordonnées verticales y du point final du robot. L'angle α_2 est obtenu en allongeant le triangle de la Fig. 5.2 dans le triangle rectangle, comme illustré à la Fig. 5.3. Encore une fois nous utiliser les fonctions trigonométriques inverses

$$1 = \arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{l_2 \sin 2}{l_1 + l_2 \cos 2}. \quad (5.13)$$

Lors du calcul de l'angle 2, nous avons deux solutions, coude vers le haut et coude vers le bas, comme illustré à la Fig. 5.4. Une solution dégénérée est représentée par le point final

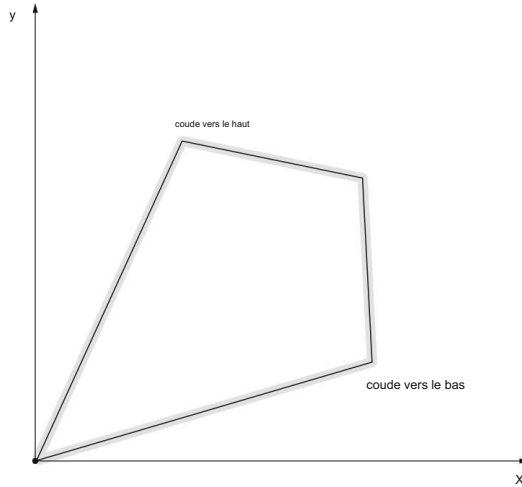


Fig. 5.4 Deux solutions de cinématique inverse

position $x = y = 0$ lorsque les deux segments sont de longueur égale $l_1 = l_2$. Dans ce cas, la $\arctan \frac{y}{x}$ n'est pas défini. Lorsque l'angle $\theta_2 = 180^\circ$, base du mécanisme simple à deux segments peut être atteinte à un angle arbitraire θ_1 . Cependant, lorsqu'un point (x, y) se trouve en dehors de l'espace de travail du manipulateur, le problème de la cinématique inverse ne peut pas être résolu.

La relation entre les vitesses articulaires et la vitesse du point final est obtenue en inversant la matrice jacobienne $J(q)$

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x}. \quad (5.14)$$

Les matrices d'ordre 2×2 peuvent être inversées comme suit

$$U_n = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad U_n^{-1} = \frac{1}{\text{dét} U_n} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}.$$

Pour notre manipulateur à deux segments, nous pouvons écrire

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \\ l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Dans les exemples généraux de robots manipulateurs, il n'est pas nécessaire que la matrice jacobienne ait la forme quadratique. Dans ce cas, la matrice dite pseudoinverse (J^+) est calculée. Pour un robot à six degrés de liberté, la matrice jacobienne est quadratique, mais après inversion, elle devient plutôt peu pratique. Lorsque le manipulateur est proche

aux poses singulières (par exemple, lorsque l'angle θ_2 est proche de zéro pour le robot simple à deux segments), la matrice jacobienne inverse est mal définie. Nous utiliserons la matrice jacobienne lors de l'étude du contrôle des robots.

5.2 Statique

Après la fin de la section sur la cinématique du robot, faisons un petit saut vers la statique du robot. Supposons que l'extrémité du robot manipulateur à deux segments heurte un obstacle (Fig. 5.5). De cette façon, le robot produit une force contre l'obstacle. La composante horizontale de la force agit dans le sens positif de l'axe x , tandis que la composante verticale est dirigée le long de l'axe y . La force contre l'obstacle est produite par les moteurs dans les articulations du robot. Le moteur de la première articulation produit le couple M_1 , tandis que M_2 est le couple dans la seconde articulation.

Les directions positives des deux couples articulaires sont dans le sens antihoraire. Comme le robot ne bouge pas, la somme des couples externes est égale à zéro. Cela signifie que le couple M_1 dans la première articulation est égal au couple de la force externe ou il est égal au couple que le manipulateur exerce sur l'obstacle

$$M_1 = -F_{xy} + F_{yx} . \quad (5.16)$$

Les coordonnées du point final x et y , calculées par Eq. (5.4), sont insérées dans l'Eq. (5.16)

$$M_1 = -F_x (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) + F_y (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)). \quad (5.17)$$

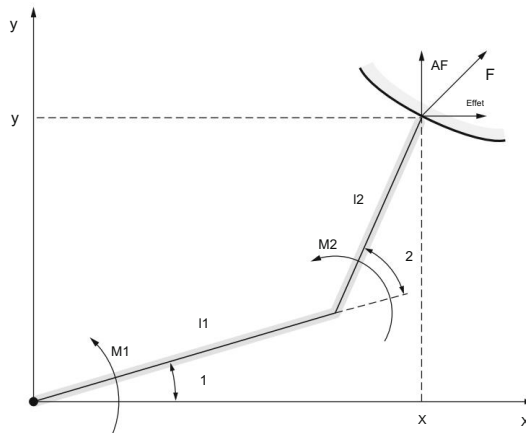


Fig. 5.5 Robot manipulateur à deux segments en contact avec l'environnement

De la même manière, le couple dans la deuxième articulation est déterminé

$$M_2 = -F_x l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_y l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \quad (5.18)$$

Les équations (5.17) et (5.18) peuvent être écrites sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Effet} \\ \text{AF} \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

La matrice dans Eq. (5.19) est une matrice jacobienne transposée. La matrice transposée d'ordre 2×2 a la forme suivante

$$U_n = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad U_n^J = \begin{bmatrix} \text{courant alternatif} & \\ & b d \end{bmatrix}.$$

De cette manière, nous avons obtenu une relation importante entre les couples articulaires et les forces au niveau de l'effecteur du robot

$$\tau = J^J(q) f, \quad (5.20)$$

où

$$\tau = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} \text{Effet} \\ \text{AF} \end{bmatrix}.$$

L'équation (5.20) décrit la statique du robot. Il sera utilisé dans le contrôle d'un robot qui est en contact avec l'environnement.

5.3 Espace de travail

L'espace de travail du robot se compose de tous les points pouvant être atteints par le point final du robot. Il joue un rôle important lors de la sélection d'un robot industriel pour une tâche anticipée. Notre objectif est de décrire une approche pour déterminer l'espace de travail d'un robot choisi. Nous reprendrons l'exemple du simple robot bi-segment planaire à articulations tournantes. Notre étude de l'espace de travail du robot se déroulera donc dans un plan et nous traiterons en fait d'une surface de travail. Quelles que soient les contraintes imposées par le plan, nous prendrons conscience des propriétés caractéristiques les plus importantes des espaces de travail du robot. Les robots industriels ont généralement la capacité de tourner autour du premier axe d'articulation vertical. Nous allons donc faire pivoter la surface de travail autour de l'axe vertical du repère de coordonnées et ainsi avoir une idée des espaces de travail tridimensionnels réalistes du robot.

Considérons le robot manipulateur planaire à deux segments comme illustré à la Fig. 5.6. Les degrés de liberté de rotation sont notés θ_1 et θ_2 . Les longueurs des segments l_1 et l_2 seront considérées comme égales. Les coordonnées du point final du robot peuvent être exprimées comme dans (5.4) avec les deux équations suivantes :

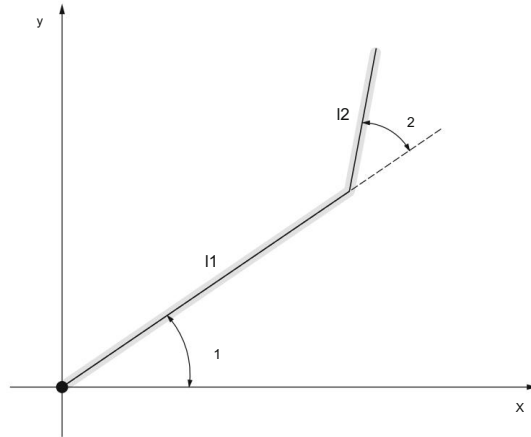


Fig. 5.6 Robot manipulateur à deux segments

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (5.21)$$

Si Éqs. (5.21) sont d'abord élevés au carré puis additionnés, les équations d'un cercle sont obtenues

$$\begin{aligned} (x - l_1 \cos \theta_1)^2 + (y - l_1 \sin \theta_1)^2 &= l_2^2 \\ x^2 + y^2 - 2x l_1 \cos \theta_1 - 2y l_1 \sin \theta_1 + l_1^2 &= l_2^2. \end{aligned} \quad (5.22)$$

La première équation ne dépend que de l'angle θ_1 , tandis que seul θ_2 apparaît dans la deuxième équation. Le maillage des cercles tracés pour différentes valeurs θ_1 et θ_2 est représenté sur la Fig. 5.7. La première équation décrit les cercles qui sont sur la Fig. 5.7 notés $\theta_1 = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$, et 180° . Leurs rayons sont égaux à la longueur du deuxième segment l_2 , les centres des cercles dépendent de l'angle θ_1 et parcourent un cercle de centre à l'origine du repère et de rayon l_1 . Les cercles de la deuxième équation ont tous leurs centres à l'origine du cadre de coordonnées, tandis que leurs rayons dépendent des longueurs des deux segments et de l'angle θ_2 entre eux.

Le maillage de la Fig. 5.7 sert à une représentation graphique simple de la surface de travail d'un robot à deux segments. Il n'est pas difficile de déterminer la surface de travail pour le cas où θ_1 et θ_2 varient dans la gamme complète de 0° à 360° . Pour le manipulateur à deux segments avec des longueurs égales des deux segments, il s'agit simplement d'un cercle de rayon $l_1 + l_2$. Des formes beaucoup plus irrégulières des espaces de travail sont obtenues lorsque l'amplitude de mouvement des articulations du robot est contrainte, comme c'est généralement le cas. La partie de la surface de travail où θ_1 passe de 0° à 60° et θ_2 de 60° à 120° est affichée hachurée sur la Fig. 5.7.

Lors du traçage des surfaces de travail du manipulateur à deux segments, nous avons supposé que les longueurs des deux segments étaient égales. Cette hypothèse sera désormais étayée par

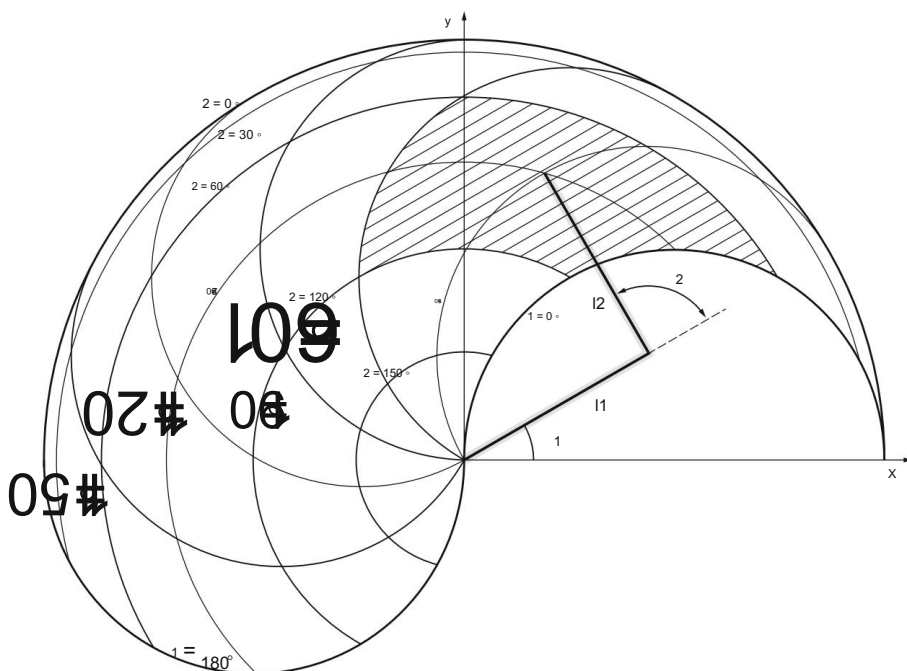


Fig. 5.7 Espace de travail d'un robot manipulateur planaire à deux segments ($l_1 = l_2$, $0^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \theta_2 \leq 180^\circ$)

une preuve suffisante. Il n'est pas difficile de se rendre compte que les segments des robots industriels SCARA et anthropomorphes sont de longueur égale. Considérons un robot à deux segments, où le deuxième segment est plus court que le premier, tandis que les angles θ_1 et θ_2 varient de 0° à 360° (Fig. 5.8). La zone de travail d'un tel manipulateur est un anneau de rayon intérieur $R_i = l_1 - l_2$ et de rayon extérieur $R_o = l_1 + l_2$. Notre objectif est de trouver le rapport des longueurs de segments l_1 et l_2 résultant en la plus grande zone de travail à somme constante des longueurs des deux segments R_o . La zone de travail du robot manipulateur à deux segments décrit est

$$\pi R - \pi R_{je}^{22} UNE = \quad (5.23)$$

En insérant l'expression du rayon intérieur dans l'équation. (5.23)

$$R^2 = (I_1 - I_2)^2 = (2I_1 - R_0)^2 \quad (5.24)$$

nous pouvons écrire

$$A = \pi R_0^2 - \pi(2l - R_0)^2. \quad (5.25)$$

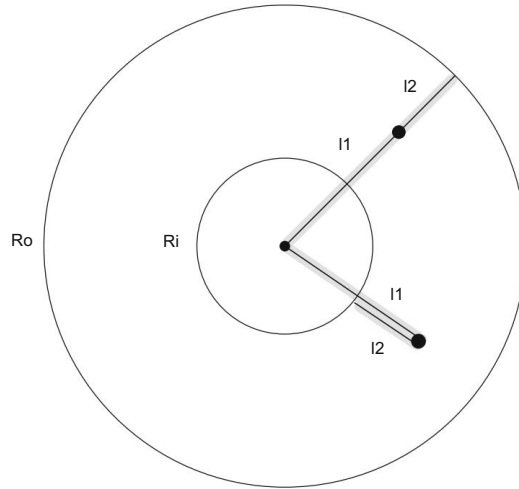


Fig. 5.8 Zone de travail du manipulateur à deux segments avec le deuxième segment plus court

Pour une aire maximale, la dérivée par rapport à la longueur du segment l_1 doit être égale à zéro

$$\frac{\partial A}{\partial l_1} = 2\pi(2l_1 - R_o) = 0. \quad (5.26)$$

La solution est

$$l_1 = \frac{R_o}{2}, \quad (5.27)$$

donnant

$$l_1 = l_2. \quad (5.28)$$

La plus grande zone de travail du mécanisme à deux segments se produit pour des longueurs égales des deux segments.

L'aire de la surface de travail dépend des longueurs de segment l_1 et l_2 et des valeurs minimales et maximales des angles θ_1 et θ_2 . En modifiant les rapports l_1/l_2 , nous pouvons obtenir différentes formes de la surface de travail du robot. La surface d'une telle surface de travail est toujours égale à celle illustrée à la Fig. 5.9. Dans cette figure, $\Delta \theta_1$ fait référence à la différence entre la valeur maximale et minimale de l'angle d'articulation $\Delta \theta_1 = (\theta_{1\max} - \theta_{1\min})$. L'aire de la surface de travail est l'aire d'un segment d'anneau

$$U_n = \frac{\Delta \theta_1 \pi}{360} (r_1^2 - r_2^2) \quad (5.29)$$

pour $\Delta \theta_1$ donné en degrés angulaires.

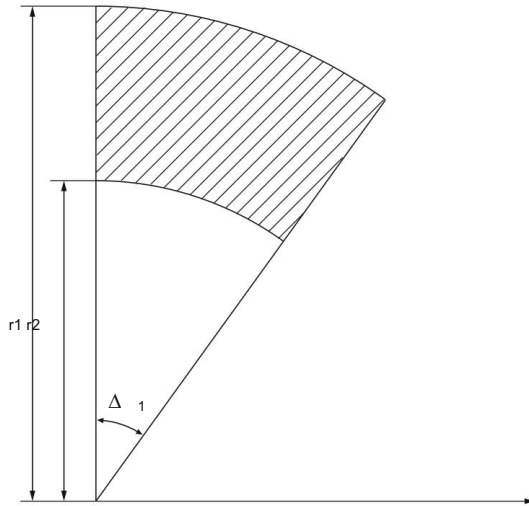


Fig. 5.9 Surface de travail d'un manipulateur à deux segments

Dans l'éq. (5.29), les rayons r_1 et r_2 sont obtenus par la règle du cosinus

$$r_1 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \alpha_2} \quad r_2 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \alpha_1} \quad (5.30)$$

L'aire de la surface de travail est, au même titre que sa forme, dépendante du rapport l_2/l_1 et des contraintes dans les angles de joint. L'angle α_1 détermine la position de la surface de travail par rapport au référentiel et n'a aucune influence sur sa forme. Examinons l'influence du deuxième angle α_2 sur l'aire de la surface de travail. Nous supposons que $l_1 = l_2 = 1$ et α_1 passe de 30° à 60° .

Pour des plages égales de l'angle α_2 (30°) et pour différentes valeurs de $\alpha_{2\max}$ et $\alpha_{2\min}$ nous obtenons différentes valeurs des zones de travail

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \alpha_2 \leq 30^\circ & \quad \text{UNE} = 0,07 \\ 30^\circ \leq \alpha_2 \leq 60^\circ & \quad \text{UNE} = 0,19 \\ 60^\circ \leq \alpha_2 \leq 90^\circ & \quad \text{UNE} = 0,26 \\ 90^\circ \leq \alpha_2 \leq 120^\circ & \quad \text{UNE} = 0,26 \\ 120^\circ \leq \alpha_2 \leq 150^\circ & \quad \text{A} = 0,19 \\ 150^\circ \leq \alpha_2 \leq 180^\circ & \quad \text{A} = 0,07. \end{aligned}$$

Jusqu'à présent, sous le terme d'espace de travail, nous envisagions l'espace de travail du robot accessible. Cela inclut tous les points de l'environnement du robot qui peuvent être atteints par le point final du robot. Souvent, cet espace de travail soi-disant habile est d'une plus grande importance. L'espace de travail habile comprend tous les points qui peuvent être atteints avec n'importe quelle orientation arbitraire de l'effecteur final du robot. Cet espace de travail est toujours

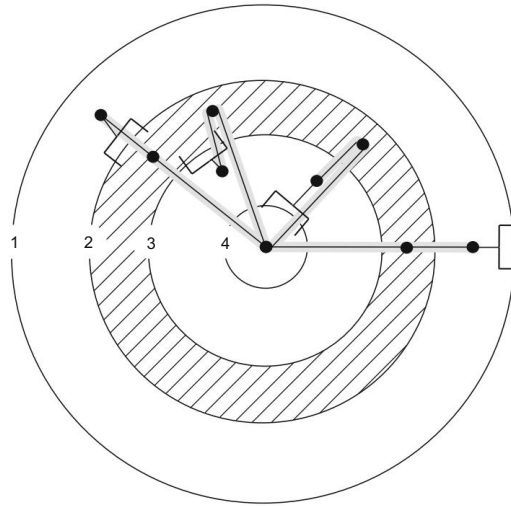


Fig. 5.10 Espace de travail accessible et adroit d'un manipulateur à deux segments avec effecteur terminal

plus petit que l'espace de travail accessible. L'espace de travail habile est plus grand lorsque le dernier segment (effecteur terminal) est plus court. Les espaces de travail accessibles et adroits d'un robot à deux segments avec l'effecteur terminal sont illustrés à la Fig. 5.10. Le deuxième et le troisième cercle sont obtenus lorsque l'effecteur du robot est orienté vers la zone contraint par les deux cercles. Ces deux cercles représentent les limites de l'espace de travail habile. Le premier et le quatrième cercle limitent l'espace de travail accessible. Les points entre le premier et le deuxième et le troisième et le quatrième cercle ne peuvent pas être atteints avec une orientation arbitraire de l'effecteur terminal.

Pour les robots ayant plus de trois articulations, l'approche graphique décrite n'est pas appropriée. Dans ce cas, nous utilisons des méthodes numériques et des algorithmes informatiques.

5.4 Dynamique

À des fins d'illustration, nous étudierons le robot manipulateur planaire à deux segments, comme illustré à la Fig. 5.11. Les segments de longueur l_1 et l_2 peuvent se déplacer dans le plan vertical $x-y$, leurs positions étant décrites par des angles par rapport à l'axe horizontal (x) ; θ_1 et $\theta_2 = \theta_1 + \alpha$. Les actionneurs aux articulations fournissent des couples M_1 et M_2 , dont la direction positive est définie par des angles croissants, c'est-à-dire le long de la direction positive de l'axe z de notre cadre de coordonnées de référence.

Nous approximations maintenant les segments par les masses ponctuelles m_1 et m_2 aux points médians de tiges rigides, mais autrement sans masse (voir Fig. 5.12). Soit r_1 la position de la masse ponctuelle m_1 par rapport à la première articulation, qui est à l'origine de notre référentiel. Soit r_2 la position de la masse ponctuelle m_2 par rapport à la deuxième articulation, qui est à la jonction des deux segments.

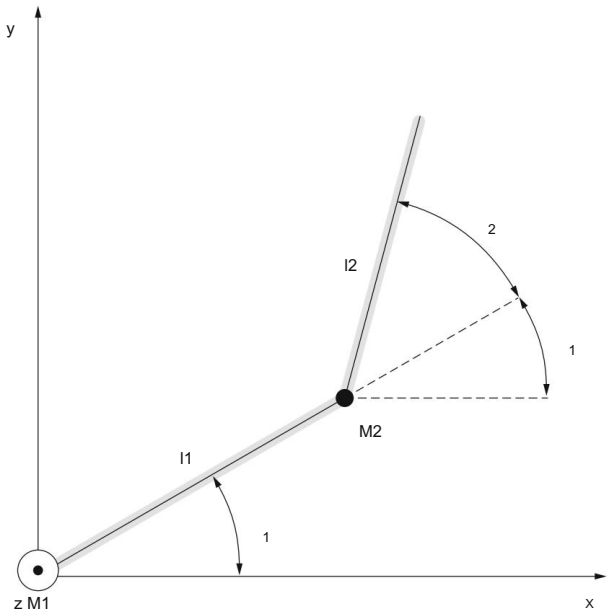


Fig. 5.11 Paramètres du robot manipulateur planaire à deux segments, qui se déplace dans le plan vertical x - y

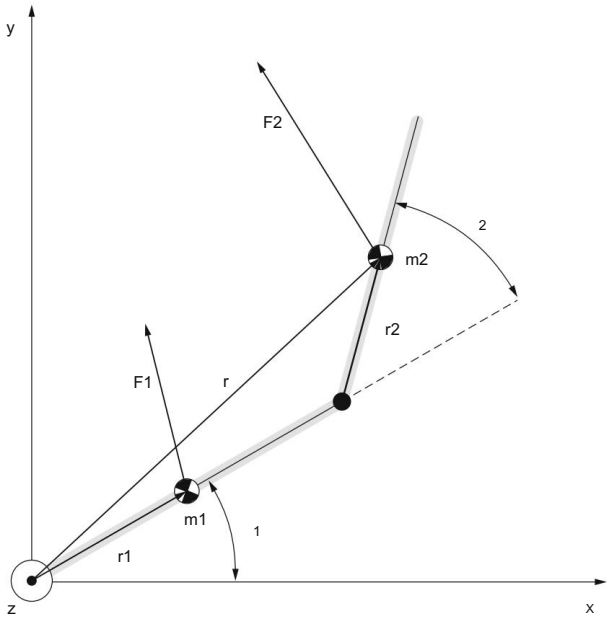


Fig. 5.12 Robot manipulateur planaire approché par les masses ponctuelles m_1 et m_2

Les masses ponctuelles m_1 et m_2 sont sollicitées par les forces transmises par les tiges sans masse, ainsi que par la force de gravité. La loi de Newton affirme que la somme vectorielle de toutes les forces agissant sur une particule est égale au produit de la masse de la particule et de son accélération. Donc,

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ et } F_2 = m_2 a_2, \quad (5.31)$$

où F_1 et F_2 représentent les sommes de toutes les forces (c'est-à-dire la force de la tige et la force de gravité), agissant sur chacune des masses ponctuelles m_1 et m_2 , tandis que a_1 et a_2 sont leurs accélérations par rapport à l'origine de la cadre de coordonnées. Ainsi, un calcul des accélérations revient à déterminer les forces sur les deux « particules ».

La position de m_1 par rapport à l'origine du référentiel est donnée par r_1 , tandis que la position de m_2 est donnée par $r = 2r_1 + r_2$ (voir Fig. 5.12). Les accélérations correspondantes sont donc $a_1 = \ddot{r}_1$ et $a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2$, où les deux points au-dessus du symbole vectoriel désignent les dérivées secondes par rapport au temps. Donc,

$$a_1 = \ddot{r}_1 \text{ et } a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2. \quad (5.32)$$

Maintenant, r_1 et r_2 représentent des tiges rigides, donc leurs longueurs sont fixes. Par conséquent, ces vecteurs ne peuvent que tourner. Rappelons-nous la physique de base, qui dit qu'un vecteur rotatif décrit une particule en mouvement circulaire. Un tel mouvement peut avoir deux composantes d'accélération (Fig. 5.13, voir aussi Appendice ??). La première composante est l'accélération radiale ou centripète a_r , qui est dirigée vers le centre de rotation. Elle est due uniquement au changement de direction de la vitesse et est donc également présente dans les mouvements circulaires uniformes. Elle est donnée par l'expression

$$a_r = -\omega^2 r, \quad (5.33)$$

où ω est la vitesse angulaire $\omega = \dot{\theta}$. La deuxième composante est l'accélération tangentielle, qui est dirigée le long de la tangente au cercle (Fig. 5.13). Elle est due au changement de l'amplitude de la vitesse et n'est présente que dans un mouvement circulaire avec une accélération angulaire $\alpha = \dot{\omega}$. Il est donné par

$$a_t = \alpha \times r, \quad (5.34)$$

où α est le vecteur d'accélération angulaire, qui est perpendiculaire au plan de mouvement, c'est-à-dire qu'il se trouve le long de l'axe z de notre cadre de coordonnées de référence. L'accélération totale est évidemment

$$a = a_r + a_t = -\omega^2 r + \alpha \times r. \quad (5.35)$$

Calculons maintenant les dérivées secondes par rapport au temps des vecteurs r_1 et r_2 . Comme indiqué ci-dessus, chacune de ces dérivées a deux composantes correspondant à l'accélération radiale et à l'accélération tangentielle. Donc

$$\ddot{r}_1 = -\omega^2 r_1 + \alpha \times r_1 \text{ et } \ddot{r}_2 = -\omega^2 r_2 + \alpha \times r_2. \quad (5.36)$$

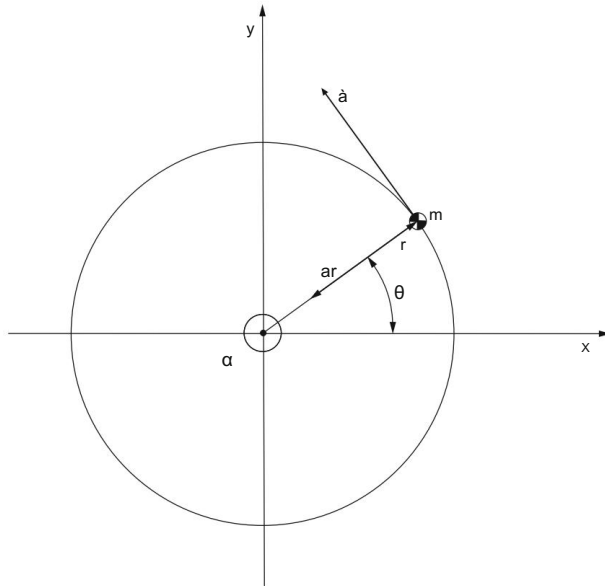


Fig. 5.13 Un vecteur tournant r de longueur fixe décrit une particule en mouvement circulaire

L'amplitude de la vitesse angulaire ω_1 et le vecteur d'accélération angulaire α_1 du premier segment sont

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 \text{ et } \alpha_1 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{k}, \quad (5.37)$$

où $\mathbf{k}$ est le vecteur unitaire le long de l'axe z . La vitesse angulaire ω_2 et l'accélération angulaire α_2 du deuxième segment sont

$$\omega_2 = \dot{\theta} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \text{ et } \alpha_2 = \ddot{\theta} \mathbf{k} = (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \mathbf{k}. \quad (5.38)$$

Ici, nous avons utilisé $\dot{\theta} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2$ (voir Figs. 5.11 et 5.12). Les dérivées secondes des vecteurs $\mathbf{r}_1$ et $\mathbf{r}_2$ peuvent s'écrire

$$\ddot{\mathbf{r}}_1 = -\omega_1^2 \mathbf{r}_1 + \alpha_1 \times \mathbf{r}_1 = -\dot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_1 + \ddot{\theta}_1 \mathbf{k} \times \mathbf{r}_1 \quad (5.39)$$

et

$$-\omega_2^2 \mathbf{r}_2 + \alpha_2 \times \mathbf{r}_2 = -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \mathbf{r}_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \mathbf{k} \times \mathbf{r}_2 = \ddot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \mathbf{k} \times \mathbf{r}_2. \quad (5.40)$$

Nous pouvons maintenant utiliser ces expressions pour calculer les accélérations des deux masses ponctuelles m_1 et m_2 correspondant à notre robot bi-segment. L'accélération $\mathbf{a}_1$ de m_1 est

$$\mathbf{a}_1 = \ddot{\mathbf{r}}_1 = -\dot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_1 + \ddot{\theta}_1 (\mathbf{k} \times \mathbf{r}_1). \quad (5.41)$$

L'accélération a_2 de m_2 est

$$a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 = -2\ddot{r}_1 + 2\ddot{r}_2 + (k \times r_1) - (\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2)(k \times r_2). \quad (5.42)$$

A partir de ces accélérations, nous obtenons les forces totales agissant sur les particules m_1 et m_2

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ et } F_2 = m_2 a_2. \quad (5.43)$$

Nous pouvons maintenant calculer les couples de ces forces par rapport à l'origine du repère de coordonnées

$$\tau_1 = r_1 \times F_1 = r_1 \times m_1 a_1 \text{ et } \tau_2 = r \times F_2 = (2r_1 + r_2) \times m_2 a_2. \quad (5.44)$$

En insérant des expressions pour a_1 et a_2 telles que dérivées ci-dessus, en nous rappelant le double produit vectoriel $[a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)]$, et en faisant patiemment la longue algèbre, nous obtenir

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_1 r_1 \ddot{r}_1 + 2m_1 r_1 \ddot{r}_2 + m_1 k r_1^2 \\ \text{et} \\ \tau_2 &= [m_2 (4r_1^2 \ddot{r}_1 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2 + m_2 r_2^2 \ddot{r}_2) + \\ &\quad + m_2 (2m_2 r_1^2 \ddot{r}_2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) - \\ &\quad - m_2 k (2r_1^2 \sin^2 \theta_2 - 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2)]k. \end{aligned} \quad (5.45)$$

La somme des deux couples sur les deux "particules" de notre système est évidemment $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

D'autre part, nous pouvons considérer notre système à deux segments composé de deux masses ponctuelles et de deux tiges sans masse d'un point de vue différent. En conséquence de la troisième loi de Newton (à chaque action il y a une réaction égale mais opposée), nous avons un théorème indiquant que les couples internes dans un système s'annulent, de sorte que seuls les couples de forces externes sont pertinents. Les couples de forces externes sur notre système de robot sont les couples de gravité et le couple exercé par la base sur laquelle repose le robot.

Le couple de la base est égal au couple M_1 de l'actionneur dans la première articulation. La somme de ces couples de forces externes (base + gravité) doit être égale à $\tau_1 + \tau_2$ (dérivés ci-dessus), car les deux résultats représentent deux façons de visualiser le couple total sur le même système. Donc

$$M_1 + r_1 \times m_1 g + r \times m_2 g = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.46)$$

Avec $r = 2r_1 + r_2$ nous avons le couple de l'actionneur dans la première articulation

$$M_1 = \tau_1 + \tau_2 - r_1 \times m_1 g - (2r_1 + r_2) \times m_2 g. \quad (5.47)$$

En se souvenant que g pointe verticalement vers le bas (c'est-à-dire le long de $-y$) et en insérant les résultats ci-dessus pour τ_1 et τ_2 , on obtient finalement

$$\begin{aligned} M_1 = & -\frac{1}{2}(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + 4m_2 r_1^2 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \\ & + \frac{1}{2}(m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) - \\ & - \frac{1}{2} 24m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 \\ & 2 + m_1 g r_1 \cos \theta_1 + 2m_2 g r_1 \cos \theta_1 + m_2 g r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (5.48)$$

Afin d'obtenir le couple M_2 de l'actionneur dans la deuxième articulation, nous allons d'abord considérer la force totale F_2 agissant sur la masse ponctuelle m_2 . La force F_2 est une somme de deux contributions. L'une est la force de gravité $m_2 g$, l'autre est la force F exercée sur m_2 par la tige sans masse et rigide du deuxième segment. Donc

$$F_2 = F_2' + m_2 g. \quad (5.49)$$

À cette équation, nous appliquons un produit vectoriel de r_2 à partir de la gauche et obtenons

$$r_2 \times F_2 = r_2 \times F_2' + r_2 \times m_2 g. \quad (5.50)$$

Le premier terme de droite est le produit vectoriel de r_2 par la force F_2' exercée sur m_2 par la tige sans masse et rigide. Ce terme est égal au couple M_2 de l'actionneur dans la deuxième articulation. (Notez que la tige peut également exercer une force sur m_2 dirigée le long de la tige, mais le produit vectoriel de cette composante avec r_2 s'annule). On obtient donc

$$M_2 = r_2 \times F_2 - r_2 \times m_2 g. \quad (5.51)$$

En substituant $m_2 a_2$ à F_2 et l'expression dérivée précédemment pour a_2 , on obtient

$$\begin{aligned} M_2 = & -\frac{1}{2}(m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \frac{1}{2} 2 + 2m_2 r_1 \\ & + \frac{1}{2} 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 + m_2 r_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (5.52)$$

Les expressions pour M_1 (5.48) et M_2 (5.52) semblent relativement compliquées, examinons donc quelques cas simples et familiers. Supposons d'abord $\theta_1 = -90^\circ$ et aucun couple dans la deuxième articulation $M_2 = 0$ (Fig. 5.14 à gauche). L'équation pour M_2 se réduit à

$$\frac{1}{2} 2m_2 r_1 = -m_2 g r_2 \sin \theta_2. \quad (5.53)$$

C'est l'équation d'un pendule simple de masse m_2 , moment d'inertie $m_2 r_2^2$, qui tourne $\frac{1}{2} \theta_2 =$ autour de la deuxième articulation avec une accélération angulaire $\frac{1}{2} \ddot{\theta}_2$ (Fig. 5.14 à gauche). Le membre de gauche est donc $J_2 \ddot{\theta}_2$ et à droite nous avons le couple dû à la pesanteur. Donc, ceci est un exemple de l'équation simple $M = J\alpha$, à laquelle notre

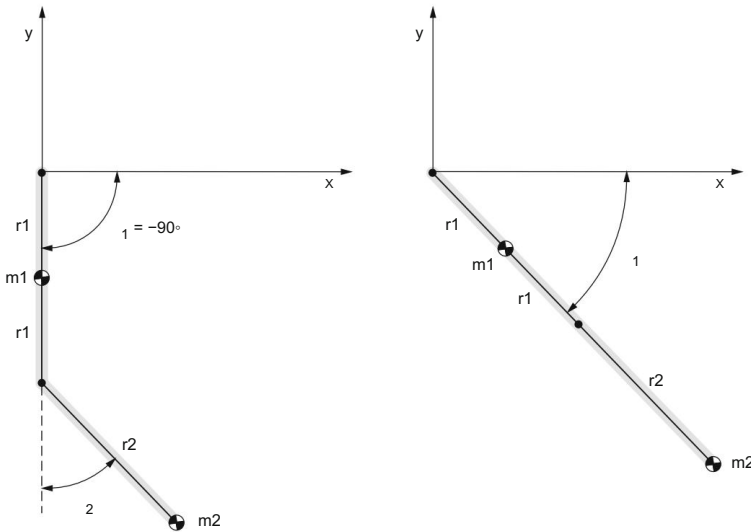


Fig. 5.14 Deux exemples simples du robot manipulateur à deux segments : $\theta_1 = -90^\circ$ (gauche) et $\theta_2 = 0^\circ$ (droite)

expression compliquée a été réduite. Pour de petites oscillations ($\theta_2 \approx 0$) nous avons $\sin \theta_2 \approx \theta_2$ et l'équation devient

$$-\ddot{\theta}_2 + \frac{g}{r_2} \theta_2 = 0. \quad (5.54)$$

C'est l'équation du pendule simple de pulsation $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{r_2}}$ et

période d'oscillation $T = 2\pi \sqrt{\frac{r_2}{g}}$.

Supposons ensuite que $\theta_2 = 0$, nous avons donc une tige rigide tournant autour d'une extrémité, qui est fixée à l'origine du cadre de coordonnées (Fig. 5.14 à droite). Si on « éteint » aussi la gravité ($g = 0$), on obtient pour le couple dans la première articulation

$$\begin{aligned} M_1 &= -\ddot{\theta}_1 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + 4m_2 r_1 r_2) = \\ &= -\ddot{\theta}_1 [m_1 r_1^2 + m_2 (2r_1 + r_2)^2] = J_{12} \alpha_1, \end{aligned} \quad (5.55)$$

où $\alpha_1 = \ddot{\theta}_1$ est l'accélération angulaire et J_{12} est le moment d'inertie combiné des deux masses. Alternativement, on pourrait prendre le couple dans la première articulation égal à zéro, inclure la gravité et on obtient un pendule relativement simple avec deux masses ponctuelles sur une tige rigide sans masse.

Mentionnons que les équations complètes ci-dessus pour M_1 et M_2 (Eqs. (5.48) et (5.52)), avec des adaptations mineures de notation, sont valables pour un double pendule avec

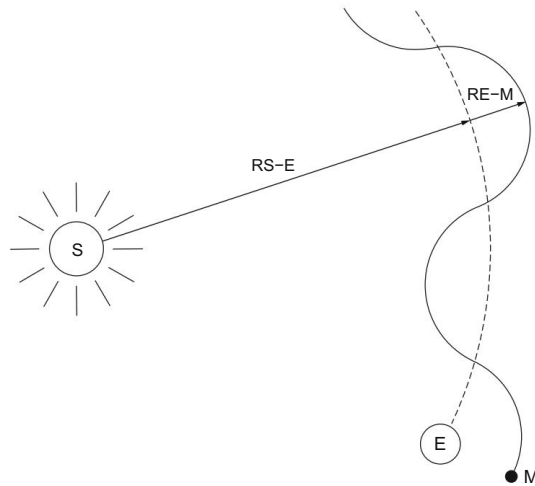


Fig. 5.15 Trajectoire schématique (sans échelle) de la Terre (courbe en pointillés) et de la Lune (courbe pleine) dans le référentiel du Soleil

friction. Les couples des actionneurs sont dans ce cas remplacés par les couples de frottement dans les articulations.

Un exercice amusant serait de comparer les trajectoires des extrémités des deux segments de notre robot simple avec les trajectoires de la Terre et de la Lune, vues depuis le référentiel du Soleil. Approchons la Terre et la Lune comme des particules ponctuelles (m_E m_M) sur des orbites circulaires coplanaires. Comme la force gravitationnelle n'agit que le long de la ligne joignant les deux particules, elle ne peut pas transmettre de couples, donc les accélérations angulaires sont nulles et les vitesses angulaires sont constantes. La vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil ($RS-E \approx 150 \cdot 10^6$ km, $T = 365$ jours, $v_E \approx 2,6 \cdot 10^6$ km/jour) est bien supérieure à la vitesse orbitale de la Lune autour de la Terre ($RE-M \approx 0,38 \cdot 10^6$ km, $T = 28$ jours, $v_M \approx 0,08 \cdot 10^6$ km/jour), donc la trajectoire de la Lune vue dans le référentiel du Soleil serait approximativement une courbe sinusoïdale superposée à l'orbite circulaire de la Terre autour du Soleil (figure 5.15).

Avec notre robot à deux segments, on pourrait avoir des vitesses angulaires plus élevées du deuxième segment résultant en différentes formes de la trajectoire de son extrémité (les épicycles de Ptolémée par exemple).

En revenant à nos équations relativement compliquées pour les couples M_1 et M_2 (équations (5.48) et (5.52)), en raison des actionneurs dans les articulations, nous voyons que ces équations peuvent être condensées sous forme de matrice représentant le modèle dynamique du robot comme

$$\tau = B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q). \quad (5.56)$$

Dans cette équation, le vecteur τ unit les couples des deux actionneurs

$$\tau = \begin{bmatrix} M1 \\ M2 \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

Les vecteurs q , $\dot{q}$ et $\ddot{q}$ appartiennent respectivement aux trajectoires, vitesses et accélérations des segments. Pour le robot à deux segments, nous avons

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}$$

Le premier terme de l'équation de τ est appelé le terme d'inertie. Dans notre cas du robot manipulateur planaire à deux segments avec $r_1 = r_2 = l$ et en simplifiant la notation avec $s1 = \sin(q_1)$, $c12 = \cos(q_1 + q_2)$ etc., nous obtenons

$$B(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}m1l^2 + \frac{5}{4}m2l^2 + m2l^2c2 & \frac{1}{4}m2l^2 + \frac{1}{2}m2l^2c2 \\ \frac{1}{4}m2l^2 + \frac{1}{2}m2l^2c2 & \frac{1}{4}m2l^2 \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

Le deuxième terme de cette équation matricielle est appelé le terme de Coriolis et comprend la vitesse et les effets centrifuges. Pour le robot à deux segments, nous avons la matrice suivante

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m2l^2\dot{q}_2s2 & \frac{1}{2}m2l^2\dot{q}_1s2 \\ \frac{1}{2}m2l^2\dot{q}_2s2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

La colonne gravitationnelle $g(q)$ a dans notre cas la forme suivante

$$g(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}m1glc1 + m2glc1 + \frac{1}{2}m2glc12 \\ \frac{1}{2}m2glc12 \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

Chapitre 6

Robots parallèles



Ce chapitre traite des robots de plus en plus populaires et performants appelés robots parallèles. Les mécanismes standard des robots industriels possèdent des chaînes cinématiques en série dans lesquelles les maillons et les articulations alternent, comme illustré à la Fig. 6.1 (à gauche). Ceux-ci sont appelés robots en série. Dernièrement, nous avons vu une avancée significative des robots parallèles. Ils comprennent des chaînes cinématiques fermées, un exemple est illustré à la Fig. 6.1 (à droite).

Dans l'industrie, les robots parallèles ont commencé à gagner du terrain au cours des deux dernières décennies. Cependant, les premiers développements remontent à 1962 lorsque Gough et Whitehall ont développé un robot parallèle pour tester les pneus automobiles. À peu près au même moment, un robot parallèle similaire a été introduit par Stewart pour concevoir un simulateur de vol. Le robot parallèle, dans lequel une plate-forme mobile est commandée par six pattes actionnées, est donc appelé la plate-forme Stewart-Gough. La percée des robots parallèles est aussi largement due au robot développé par Clavel dans les années 80. Son mécanisme a été breveté aux USA en 1990 sous le nom de robot Delta. Les mécanismes parallèles en robotique étaient devenus un sujet de recherche scientifique systématique au début des années quatre-vingt. Ces activités se sont considérablement intensifiées dans les années 90 et ont culminé avec quelques réalisations clés dans le domaine de la cinématique des robots en général.

6.1 Caractéristiques des robots parallèles

Dans les robots en série, le nombre de degrés de liberté est identique au nombre total de degrés de liberté dans les articulations. Ainsi, toutes les articulations doivent être actionnées, et généralement seules des articulations de translation et de rotation simples à un degré de liberté sont utilisées. Dans les robots parallèles, le nombre de degrés de liberté est inférieur au nombre total de degrés de liberté dans les articulations, de sorte que de nombreuses articulations sont passives. Les articulations passives peuvent être plus complexes ; les représentants typiques sont le joint universel et le joint sphérique. Le joint universel se compose de deux rotations perpendiculaires tandis que trois rotations perpendiculaires

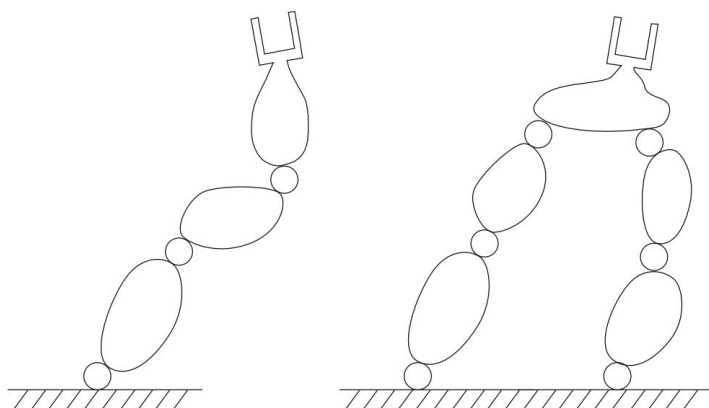


Fig. 6.1 Chaîne cinématique en série (à gauche) et chaîne cinématique fermée (à droite)

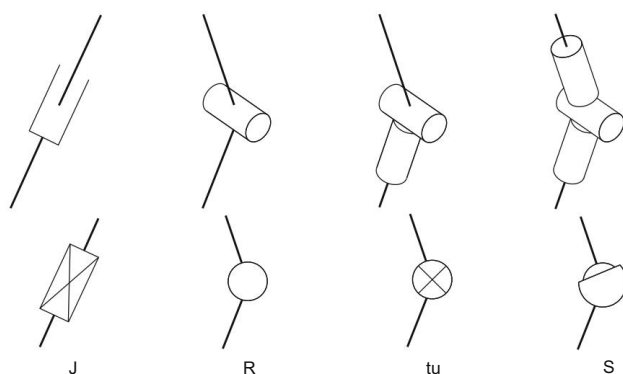


Fig. 6.2 Types de joints souvent utilisés dans les mécanismes parallèles

les rotations composent l'articulation sphérique comme le montre la Fig. 6.2. Ici, les lettres T, R, U et S sont utilisées pour marquer respectivement l'articulation de translation, l'articulation de rotation, l'articulation universelle et l'articulation sphérique.

Dans les robots parallèles, le dernier maillon (supérieur) des mécanismes est ce qu'on appelle la plate-forme (Fig. 6.3). La plate-forme est le lien actif auquel l'effecteur final est attaché. Il est relié à la base fixe par un nombre donné de mécanismes (généralement) en série appelés pattes. L'ensemble de la structure contient au moins une chaîne cinématique fermée (minimum deux branches). Les déplacements dans les jambes produisent un déplacement de la plate-forme comme le montre la Fig. 6.3. Les mouvements de la plate-forme et des jambes sont liés par des expressions trigonométriques souvent très complexes (cinématique directe et inverse) dépendant de la géométrie du mécanisme, du type d'articulations, du nombre de jambes et de leurs dispositions cinématiques.

Malheureusement, il n'existe pas de dénominations uniques et uniformes pour les robots parallèles. Dans ce travail, un robot parallèle est désigné par le type de chaînes cinématiques représentées.

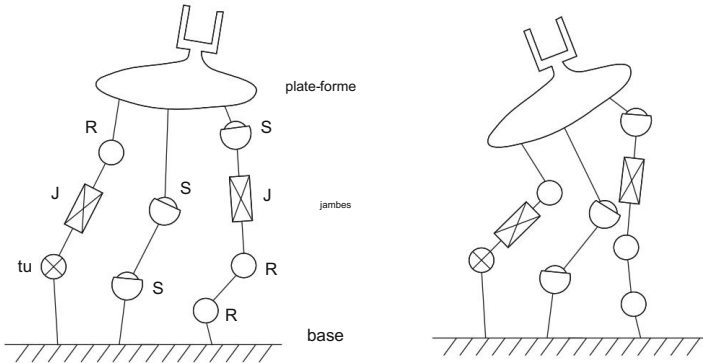


Fig. 6.3 Structure de base d'un robot parallèle

envoyer les jambes. Ainsi, le robot de la Fig. 6.3 est dénommé UTR-SS-RRTS. Lorsque des jambes du même type sont répétées, par exemple dans le robot TRR-TRR-TRR, la dénomination peut être simplifiée en 3TRR.

Nombre de degrés de liberté

Chaque articulation contribue à la mobilité du robot en introduisant un nombre donné de degrés de liberté ou, alternativement, en introduisant un nombre correspondant de contraintes, qui sont définies comme suit. Soit λ le nombre maximum de degrés de liberté d'un corps en mouvement libre (dans l'espace $\lambda = 6$ et dans le plan $\lambda = 3$), et soit f_i le nombre de degrés de liberté de la i -ème articulation. Le nombre de contraintes correspondant est

$$c_i = \lambda - f_i . \quad (6.1)$$

Dans la pratique robotique où les robots en série dominent, nous considérons généralement les articulations comme des éléments qui ajoutent des degrés de liberté au mouvement de l'effecteur final du robot. Dans les robots parallèles, au contraire, il est plus avantageux de considérer le mouvement de la plate-forme (à laquelle l'effecteur est attaché), en tenant compte du nombre de contraintes introduites par les articulations. Ainsi, un joint universel U dans un espace où $\lambda = 6$ introduit $f_i = 2$ degrés de liberté et $c_i = \lambda - f_i = 6 - 2 = 4$ contraintes.

Ou, par exemple, dans un plan où $\lambda = 3$, une articulation en rotation R introduit $f_i = 1$ degrés de liberté et $c_i = \lambda - f_i = 3 - 1 = 2$ contraintes, alors que la même articulation dans l'espace introduit $c_i = \lambda - f_i = 6 - 1 = 5$ contraintes. Notez que les articulations de rotation et de translation peuvent fonctionner à la fois dans un plan et dans l'espace, alors que les articulations sphériques et universelles ne produisent que des mouvements spatiaux et ne peuvent pas être utilisées dans les robots planaires.

Le nombre de degrés de liberté d'un robot parallèle est inférieur au nombre total de degrés de liberté apportés par les articulations du robot, contrairement à un robot en série où ces deux nombres sont identiques. Soit N le nombre de liaisons mobiles du robot et n le nombre d'articulations. Les articulations sont appelées $i = 1, 2, \dots, n$. Chaque articulation possède f_i degrés de liberté et c_i contraintes. Les N liaisons mobiles libres possèdent $N\lambda$ degrés de liberté. Lorsqu'ils sont combinés en un mécanisme, leur mouvement

est limité par les contraintes introduites par les articulations, de sorte que le nombre de degrés de liberté d'un mécanisme de robot est

$$F = N\lambda - \sum_{j=1}^n c_j. \quad (6.2)$$

Ici, en remplaçant c_j par $\lambda - f_j$ nous obtenons la formule bien connue de Grübler comme suit

$$F = \lambda(N - n) + \sum_{j=1}^n f_j. \quad (6.3)$$

Il ne faut pas oublier que le nombre de moteurs qui commandent le mouvement d'un robot est égal à F .

Notez que dans les robots en série, le nombre de liens mobiles et le nombre d'articulations sont identiques ($N = n$), de sorte que la première partie de la formule de Grübler est toujours nulle ($\lambda(N - n) = 0$). Cela explique pourquoi le nombre de degrés de liberté dans les robots en série est simplement

$$F = \sum_{j=1}^n f_j. \quad (6.4)$$

Une forme très pratique de la formule de Grübler pour calculer les degrés de liberté d'un robot parallèle peut être obtenue comme suit. Supposons qu'un mécanisme parallèle comporte $k = 1, 2, \dots, K$ jambes, et que chacune des jambes possède v_k degrés de liberté et par conséquent $\xi_k = \lambda - v_k$ contraintes. Lorsque la plate-forme n'est pas reliée aux jambes et peut se déplacer librement dans l'espace, elle contient λ degrés de liberté. Le nombre de degrés de liberté d'une plate-forme connectée peut ainsi être calculé en soustrayant la somme des contraintes introduites par les jambes

$$F = \lambda - \sum_{k=1}^K \xi_k. \quad (6.5)$$

Les équations (6.3) et (6.5) sont mathématiquement identiques et peuvent être transformées de l'une à l'autre par de simples opérations algébriques.

Nous pouvons maintenant calculer les degrés de liberté du robot illustré à la Fig. 6.3. Ce robot possède $N = 7$ liens mobiles et $n = 9$ articulations. Le nombre total de degrés de liberté dans les articulations est de 16 (3 articulations de rotation, 2 articulations de translation, 1 articulation universelle et 3 articulations sphériques). En utilisant la formule standard de Grübler donnée dans l'équation. (6.3), on obtient

$$F = 6(7 - 9) + 16 = 4.$$

Si nous utilisons maintenant la forme modifiée de la formule de Grübler, nous devons calculer les contraintes introduites par chaque jambe. C'est assez simple car il suffit de soustraire le nombre de degrés de liberté de chaque jambe de λ . Pour le robot donné (jambes

sont comptés de gauche à droite) nous avons $\xi_1 = 2$, $\xi_2 = 0$ et $\xi_3 = 0$. En introduisant ces valeurs dans l'Eq. (6.5), comme attendu, on obtient

$$F = 6 - 2 = 4.$$

Avantages et inconvénients des robots parallèles

L'introduction de robots parallèles dans l'industrie est motivée par le nombre d'avantages significatifs des robots parallèles par rapport aux robots en série. Les plus évidentes sont les suivantes :

Capacité de charge, rigidité et précision. La capacité de charge des robots parallèles est considérablement supérieure à celle des robots en série. Les robots parallèles sont également plus rigides et leur précision de positionnement et d'orientation d'un effecteur terminal est plusieurs fois supérieure à celle des robots en série.

Excellentes propriétés dynamiques. La plate-forme peut atteindre des vitesses et des accélérations élevées. De plus, la fréquence de résonance d'un robot parallèle est de plusieurs ordres de grandeur plus élevée.

Construction simple. Plusieurs articulations passives dans des robots parallèles permettent une construction mécanique simple et moins coûteuse. Lors de la construction de robots parallèles, des roulements, des broches et d'autres éléments de machine standard peuvent être utilisés.

L'utilisation de robots parallèles est néanmoins limitée. En raison des jambes emmêlées, les robots parallèles peuvent avoir des difficultés à éviter les obstacles dans leur espace de travail. D'autres inconvénients importants sont:

Petit espace de travail. Les robots parallèles ont des espaces de travail considérablement plus petits que les robots série de taille comparable. Leur espace de travail peut être encore réduit puisque lors du mouvement de la plate-forme les jambes peuvent interférer l'une avec l'autre.

Cinématique complexe. Le calcul de la cinématique des robots parallèles est complexe et long. Contrairement aux robots en série, où la difficulté survient lors de la résolution du problème de cinématique inverse, dans les mécanismes parallèles, la difficulté survient lors de la résolution du problème de cinématique directe.

Singularités cinématiques fatales. Les robots en série dans des poses cinématiques singulières perdent leur mobilité. Les robots parallèles dans des poses singulières gagnent des degrés de liberté, qui ne peuvent pas être contrôlés. C'est une situation fatale car elle ne peut pas être résolue.

6.2 Dispositions cinématiques des robots parallèles

Nous pouvons créer un nombre immense d'arrangements cinématiques de robots parallèles.

Dans la pratique industrielle, cependant, seuls quelques-uns d'entre eux sont utilisés. La plus populaire et la plus générale au sens cinématique est la plate-forme Stewart-Gough, comme le montre la Fig. 6.4.

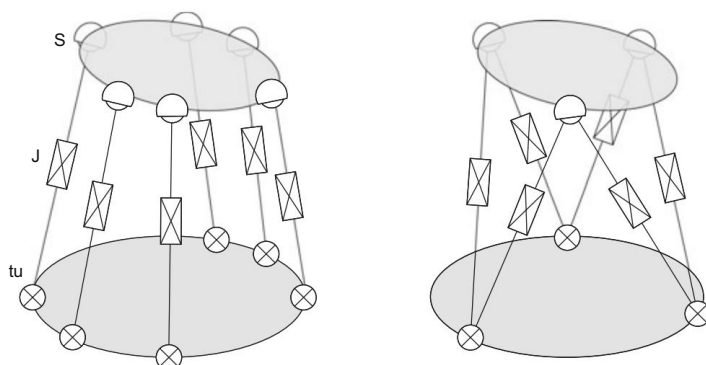


Fig. 6.4 La plate-forme Stewart-Gough

Plateforme Stewart-Gough

Une plate-forme générale de Stewart-Gough est représentée sur le côté gauche de la Fig. 6.4. Selon notre dénomination, le mécanisme est de type 6UTS. Le robot contient $n = 18$ articulations, $N = 13$ liens mobiles et la somme de $f_i, i = 1, 2, \dots, n$ est 36. Cela donne le résultat attendu

$$F = 6(13 - 18) + 36 = 6$$

degrés de liberté. La plate-forme de ce robot peut être spatialement positionnée et orientée sous la commande de six moteurs, qui sont typiquement les six translations. En raccourcissant ou en élargissant les jambes (en modifiant la longueur des jambes), la plate-forme peut être déplacée dans une pose souhaitée (position et orientation). Un avantage particulier de la plate-forme Stewart Gough avec les jambes UTS est que les charges agissant sur la plate-forme sont transférées à chaque jambe particulière sous la forme d'une force longitudinale dans la direction de la jambe et qu'il n'y a pas de charge transversale sur les jambes. Cette particularité permet d'excellentes performances dynamiques.

Le nombre de degrés de liberté d'un segment UTS est de six et le nombre de contraintes est de zéro. Si l'on considère la formule de Grübler (6.5) il est facile de vérifier que le nombre de pattes UTS n'affecte pas le nombre de degrés de liberté du robot et que la mobilité de la plate-forme de Stewart-Gough ne dépend pas du nombre de pattes.

Un robot avec une seule jambe UTS, qui est un robot en série, possède six degrés de liberté, les mêmes que le robot Stewart-Gough original à six jambes entièrement parallèle.

Le mécanisme à six pieds sur le côté droit de la Fig. 6.4 représente schématiquement la plate-forme originale de Stewart-Gough qui a une forme d'étoile à symétrie centrale. Dans cet agencement, deux par deux jambes sont serrées en un point dans lequel deux joints sphériques (ou universels) coïncidents qui se chevauchent sont placés. Par conséquent, le nombre de joints sphériques indépendants est de six et le même est le nombre de joints universels.

Les articulations qui se chevauchent simplifient non seulement la construction, mais permettent également des calculs plus faciles de la cinématique et de la dynamique du robot.

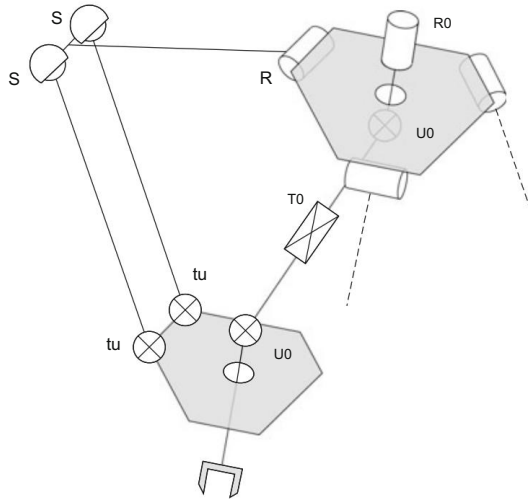


Fig. 6.5 Le robot Delta

Robot delta

En raison de ses caractéristiques de mouvement spécifiques et de ses nombreuses applications dans l'industrie, le robot Delta a trouvé sa place parmi les fabricants de robots (voir Fig. 6.5). La cinématique de ce robot est très sophistiquée. L'objectif principal de son créateur était de créer un robot léger aux performances dynamiques extrêmes.

La base fixe du robot est l'hexagone supérieur tandis que l'hexagone inférieur représente la plate-forme mobile. Le robot a trois pattes latérales. Un seul est présenté sur la figure, avec un joint R, deux joints S et deux joints U ; les deux autres jambes sont symboliquement dessinées avec une ligne pointillée. Il existe également une jambe médiane indépendante R0U0T0U0 qui n'a aucune influence sur le mouvement de la plate-forme. Il existe un mécanisme d'gramme parallèle entre le milieu de la jambe et la base, qui se compose de deux articulations sphériques S et de deux joints universels U. Chaque jambe a donc 3 liens et 5 articulations. Sans tenir compte de la jambe médiane, le nombre de degrés de liberté du mécanisme est

$$F = 6(10 - 15) + 33 = 3.$$

La pose de la plate-forme est déterminée par seulement trois variables. Dans la version originale du robot Delta, les trois angles de rotation R dans les jambes latérales sont contrôlés par des moteurs. En raison de la structure en parallélogramme des jambes, la plate-forme n'exécute qu'une translation et est toujours parallèle à la base.

Le but de la jambe médiane est de transférer la rotation R0 à travers la plate-forme au préhenseur au point final du robot. Il agit comme un arbre de transmission télescopique pour faire tourner la pince. Cette branche est un cardan à deux joints universels U0 séparés par un joint de translation T0. Au total, le mécanisme possède quatre degrés de liberté : trois en translation, permettant le positionnement spatial de la pince et un en rotation, permettant

rotation de la pince autour d'un axe perpendiculaire à la plate-forme. Tous les actionneurs du mécanisme Delta sont fixés à la base et ne bougent pas. Par conséquent, le mécanisme est extrêmement léger et la plate-forme peut se déplacer avec des vitesses et des accélérations élevées.

Robots parallèles planaires

Les exemples suivants sont des robots planaires parallèles qui opèrent dans un plan donné où $\lambda = 3$. Le premier exemple est donné sur la Fig. 6.6 à gauche. Le robot contient trois jambes de type RTR-RRR-RRR. En conséquence, nous avons $N = 7$ et $n = 9$ et le nombre total de degrés de liberté dans les articulations est de 9. Selon l'équation. (6.3), le nombre de degrés de liberté de ce robot est

$$F = 3(7 - 9) + 9 = 3.$$

Le résultat est attendu puisque toutes les jambes introduisent des contraintes nulles (6.5). Par conséquent, la plate-forme peut réaliser n'importe quelle pose souhaitée à l'intérieur de l'espace de travail. Notez que dans le plan, deux degrés de liberté sont nécessaires pour la position (translations dans le plan $x-y$) et un degré de liberté pour l'orientation (une rotation autour de l'axe z). Pour activer ce robot trois moteurs sont nécessaires. Pour fixer les moteurs, nous pouvons sélectionner l'un des neuf joints. Habituellement, nous préférons les articulations fixées à la base afin que les moteurs ne bougent pas et que leur poids n'influence pas la dynamique du robot. Dans un cas particulier, l'articulation de translation peut également être motorisée à l'aide d'une électrobroche ou d'un vérin hydraulique.

Dans la Fig. 6.6 à droite, un robot parallèle planaire similaire est présenté, sa structure est RTR RR-RR. Ici, nous pouvons voir que chacune des deux jambes RR introduit une contrainte. Selon l'éq. (6.5), le nombre de degrés de liberté de ce robot parallèle est

$$F = 3 - 2 = 1.$$

Le robot est contrôlé à l'aide d'un moteur. La plate-forme a une mobilité limitée et ne peut se déplacer que le long d'une courbe dans le plan $x-y$. On peut, par exemple, soit positionner le

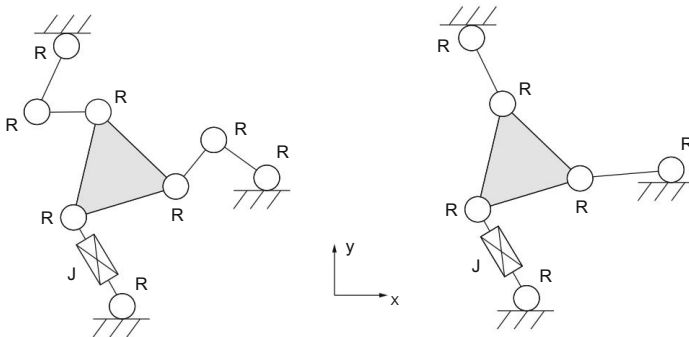


Fig. 6.6 Robots planaires parallèles

plate-forme le long de l'axe x sans avoir le contrôle sur y et l'orientation de la plate-forme ou, alternativement, orienter la plate-forme sans avoir le contrôle sur sa position en x et y.

Épaule humanoïde parallèle

Les mécanismes parallèles sont très courants dans la nature, dans le corps humain ou chez les animaux. Il n'est donc pas surprenant que les modèles de robots parallèles puissent être utilisés efficacement pour simuler les propriétés biomécaniques des humains où les muscles et les ligaments étirés sur les articulations forment diverses structures cinématiques parallèles. Par exemple, le complexe de l'épaule peut être représenté par deux compositions de base, l'articulation dite interne, qui comprend le mouvement de la clavicule et de l'omoplate par rapport au tronc, et l'articulation dite externe, qui est associée au articulation gléno-humérale. Dans la robotique humanoïde d'aujourd'hui, le mouvement de l'articulation interne est généralement négligé en raison de sa complexité mécanique. Néanmoins, sa contribution au mouvement humain, à la portée du bras et à la dynamique est cruciale.

Un mécanisme d'épaule parallèle représentant l'intérieur de l'épaule a été proposé dans la littérature. Son mouvement est illustré à la Fig. 6.7. La structure proposée est TS-3UTS.

Il y a une jambe centrale T0S0 avec quatre degrés de liberté et deux contraintes. Autour de l'axe de la jambe centrale sont fixées trois jambes latérales de l'UTS possédant chacune six degrés de liberté, leur nombre de contraintes est nul. Selon l'éq. (6.5), le nombre de degrés de liberté du robot est

$$F = 6 - 2 = 4.$$

Le robot peut produire une orientation complète de la plate-forme (environ trois angles d'orientation principaux) et peut se dilater ou se rétrécir de la même manière que l'épaule humaine. Le bras est attaché à cette plate-forme par l'articulation gléno-humérale. Les articulations internes de l'épaule, telles qu'elles sont proposées, imitent précisément le mouvement du bras, y compris le haussement d'épaules

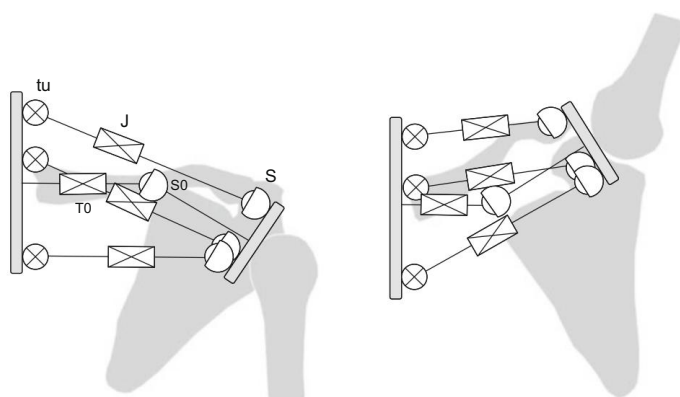


Fig. 6.7 Robot parallèle imitant le mécanisme de l'épaulement intérieur

et en évitant les collisions avec le corps, et offre une excellente capacité de charge statique et des capacités dynamiques.

6.3 Modélisation et conception de robots parallèles

La plupart des robots parallèles qui apparaissent dans l'industrie ou dans les laboratoires de recherche possèdent des agencements cinématiques symétriques. Du point de vue de leur construction, il est utile qu'ils soient composés des mêmes éléments mécaniques.

La symétrie contribue également à simplifier leur traitement mathématique.

Un groupe commun d'agencements cinématiques est représenté par le robot d'épaule décrit précédemment. Ce groupe contient une branche centrale à v_1 degrés de liberté autour de laquelle sont placées symétriquement des branches latérales, qui sont souvent de type UTS possédant $v_2, v_3, \dots, v_K = \lambda$ degrés de liberté (et aucune contrainte). La jambe centrale est donc cruciale pour déterminer les propriétés cinématiques de l'ensemble du robot, car le nombre de degrés de liberté du robot est $F = v_1$.

Le deuxième groupe d'arrangements cinématiques est représenté par la plate-forme de Stewart Gough dans laquelle toutes les jambes sont identiques et sont généralement de type UTS de sorte que $v_1, v_2, \dots, v_K = \lambda$. Lorsque $v_1, v_2, \dots, v_K < \lambda$ seul un petit nombre de ces robots sont mobiles, la plupart de leurs structures sont à degrés de liberté nuls ou négatifs. Les robots avec un nombre négatif de degrés de liberté sont dits surcontraints.

Considérons le deuxième groupe de robots (structure cinématique de type Gough-Stewart) avec un seul moteur dans chaque jambe. Un tel robot doit avoir $K = F$ jambes, car un robot avec $K < F$ ne peut pas être contrôlé. Il est facile de vérifier que seuls les robots suivants peuvent exister dans l'espace (où $\lambda = 6$)

$$\begin{aligned} K = 1, v_1 &= 1 \\ K = 2, v_1 &= v_2 = 4 \\ K = 3, v_1 &= v_2 = v_3 = 5 \\ K = 6, v_1 &= v_2 = \dots = v_6 = 6 \end{aligned}$$

Les robots de ce groupe à quatre et cinq pattes n'existent pas. Dans le plan, où $\lambda = 3$, seuls les robots suivants peuvent exister

$$\begin{aligned} K &= 1, v_1 = 1 \\ K &= 3, v_1 = v_2 = v_3 = 3 \end{aligned}$$

Dans le cas planaire, les robots à deux jambes n'existent pas.

Paramètres cinématiques et coordonnées des robots parallèles

Sur la Fig. 6.8, le cadre de coordonnées $x-y-z$ est attaché à la plate-forme mobile, tandis que $x_0-y_0-z_0$ est fixé à la base. La position de la plate-forme est donnée par rapport au repère fixe par le vecteur r ; ses composantes sont r_x, r_y, r_z . L'orientation

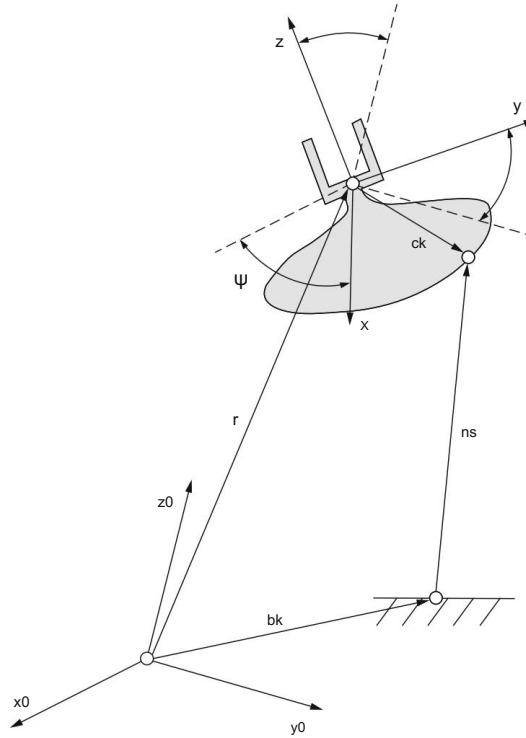


Fig. 6.8 Paramètres cinématiques d'un robot parallèle

de la plate-forme peut être décrit par un triplet choisi d'angles d'orientation ψ , θ , ϕ , apparaissant entre les deux référentiels (voir Chap. 4 pour plus de détails).

Le vecteur b_k définit l'attachement de la jambe k à la base exprimé dans le cadre x_0 - y_0 - z_0 , tandis que le vecteur c_k définit l'attachement de la même jambe à la plate-forme dans le cadre x - y - z . Les vecteurs

$$p_k = r + R c_k - b_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.6)$$

décrivent la géométrie des jambes du robot exprimée dans le cadre de coordonnées x_0 - y_0 - z_0 . Ici, $R = R(\psi, \theta, \phi)$ est la matrice de rotation 3×3 qui transforme le cadre de coordonnées x - y - z en x_0 - y_0 - z_0 . L'équation (6.6) peut également être formulée sous une forme homogène comme suit

$$d_k = H c_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.7)$$

où la matrice de transformation homogène est

$$H = \begin{bmatrix} R & r - b_k & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Nous supposons que les longueurs des jambes sont les coordonnées articulaires du robot

$$q_k = d_k, k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.9)$$

où $\cdot$ indique la norme vectorielle. Ce sont des éléments du vecteur de coordonnées articulaires

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_K)^T.$$

Les paramètres cinématiques du robot sont les vecteurs b_k , $k = 1, 2, \dots, K$ exprimés dans le repère $x_0-y_0-z_0$ et les vecteurs c_k exprimés dans le repère $x-y-z$.

Une fois que nous avons défini les coordonnées internes, regardons quelles sont les coordonnées externes du robot. Dans les robots parallèles, ils représentent généralement certaines caractéristiques du mouvement de la plate-forme à laquelle l'effecteur est attaché. Dans la plupart des cas, les coordonnées externes choisies sont la position et l'orientation de la plate-forme, les coordonnées dites cartésiennes. Dans l'espace où $\lambda = 6$, ils incluent les trois composantes r_x, r_y, r_z du vecteur de position de la Fig. 6.8, et les trois angles d'orientation ψ, θ, ϕ , de sorte que le vecteur de coordonnées externes est défini comme suit

$$p = (r_x, r_y, r_z, \psi, \theta, \phi)^T.$$

Cinématique inverse et directe des robots parallèles

Du point de vue du contrôle, la relation entre les coordonnées externes et internes est de la plus haute importance. Leur relation est, comme pour les robots en série, déterminée par des équations trigonométriques algébriques très compliquées.

Le problème de cinématique inverse des robots parallèles nécessite de déterminer les coordonnées internes q , qui sont les longueurs des jambes, à partir d'un ensemble donné de coordonnées externes p , qui représentent la position et l'orientation de la plate-forme. Pour un ensemble donné de coordonnées externes p , les coordonnées internes peuvent être obtenues en résolvant simplement l'équation. (6.7). Ici, contrairement aux robots en série, il est important de reconnaître que les valeurs des coordonnées externes définissent de manière unique les longueurs des jambes du robot parallèle et que le calcul est simple.

Le problème de cinématique directe des robots parallèles nécessite de déterminer les coordonnées externes p à partir d'un ensemble donné de coordonnées articulaires q (Fig. 6.9). Ce problème est extrêmement compliqué sur le plan mathématique et les procédures de calcul sont lourdes. En général, il n'est pas possible d'exprimer les coordonnées externes comme des fonctions explicites des coordonnées internes, alors qu'avec les robots en série, cela est assez simple. Habituellement, ce sont des équations trigonométriques et quadratiques couplées qui ne peuvent être résolues sous forme fermée que dans des cas particuliers. Il n'existe pas de règles sur la manière d'aborder les solutions symboliques. Les difficultés suivantes sont courantes :

Inexistence d'une vraie solution. Pour certaines valeurs de coordonnées internes, les solutions réelles pour les coordonnées externes n'existent pas. Les intervalles de coordonnées internes lorsque cela peut se produire ne peuvent pas être prévus à l'avance.

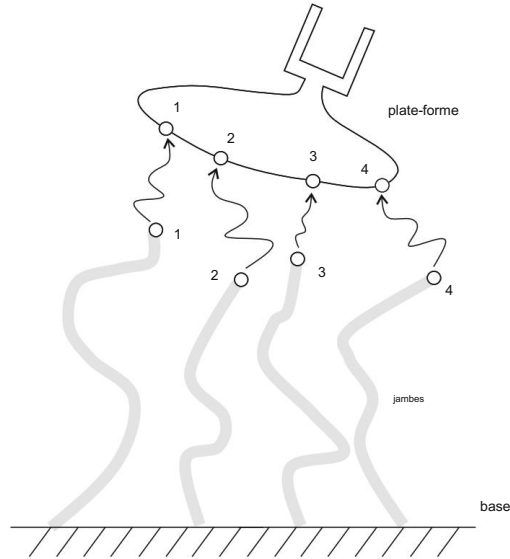


Fig. 6.9 Le problème de cinématique directe consiste à trouver la pose de la plate-forme correspondant à la longueur des jambes. Les points d'extrémité des jambes doivent correspondre aux points correspondants sur la plate-forme (par exemple, 1 - 1)

Solutions multiples. Pour un ensemble donné de coordonnées internes, il existe plusieurs solutions pour les coordonnées externes. Le nombre de solutions pour une combinaison donnée de longueurs de jambes dépend de la structure cinématique du mécanisme. La plate-forme générale de Stewart-Gough a quarante solutions possibles du problème de cinématique directe. Pour une combinaison sélectionnée de longueurs de jambes, il existe quarante poses différentes de la plate-forme. De plus, il est parfois impossible de faire la transition entre deux poses de la plate-forme car les jambes s'emmêlent. Dans de tels cas, la plate-forme ne pouvait passer d'une pose à une autre qu'en démontant les jambes dans la première pose et en les remontant dans la nouvelle pose.

Inexistence de solutions fermées. Généralement pour un ensemble donné de coordonnées articulaires, il n'est pas possible de trouver une solution exacte au problème de cinématique directe, même si une vraie solution existe. Dans de tels cas, nous utilisons des techniques numériques qui peuvent ne pas nécessairement converger et ne pas trouver toutes les solutions.

Conception de robots parallèles

La conception des robots parallèles dépend des performances, de la flexibilité, de la mobilité et de la capacité de charge souhaitées, ainsi que de l'espace de travail réel.

En considérant les espaces de travail pour les robots parallèles et série, nous faisons référence à l'espace de travail accessible et à l'espace de travail habile. L'un des principaux inconvénients des robots parallèles est leur petit espace de travail. L'objectif principal de l'analyse de l'espace de travail est donc de déterminer si une trajectoire souhaitée se trouve à l'intérieur de l'espace de travail du robot. La taille de l'espace de travail dans les robots parallèles est limitée par les plages de déplacements des

des jambes, des déplacements d'articulations passives, et, en particulier, par des interférences entre les jambes du robot. Même avec de petits mouvements, les jambes peuvent se heurter. L'entrelacement des jambes est en pratique un obstacle majeur au mouvement d'un robot et à son accessibilité. La détermination et l'analyse de l'espace de travail du robot est en général un processus fastidieux. Dans les robots parallèles, c'est généralement encore plus complexe, en fonction du nombre de degrés de liberté et de l'architecture du mécanisme.

L'effet de la charge dans les robots en série est généralement considéré en termes de dynamique, qui inclut dans une large mesure l'inertie des liaisons. La contribution d'une force externe est généralement plus faible et, dans de nombreux cas, peut être négligée. Dans les robots parallèles avec un grand nombre de pattes, où les liens sont très légers et les moteurs généralement attachés à la base fixe, la statique du robot joue un rôle important. Le calcul de la statique du robot est lié à la matrice jacobienne bien connue qui représente la transformation entre les coordonnées externes et internes. Cela va au-delà de la portée de notre livre, mais une littérature considérable, des articles et des manuels sont à la disposition du lecteur intéressé.

En pratique, nous pouvons souvent voir une plate-forme Stewart-Gough qui a une structure telle que présentée à la Fig. 6.10. Le robot contient (au lieu de six pattes de type UTS) six pattes de type STS. Cinématiquement, cette architecture est assez inhabituelle et redondante. Le robot a trop de degrés de liberté. Chaque jambe possède 7 degrés de liberté

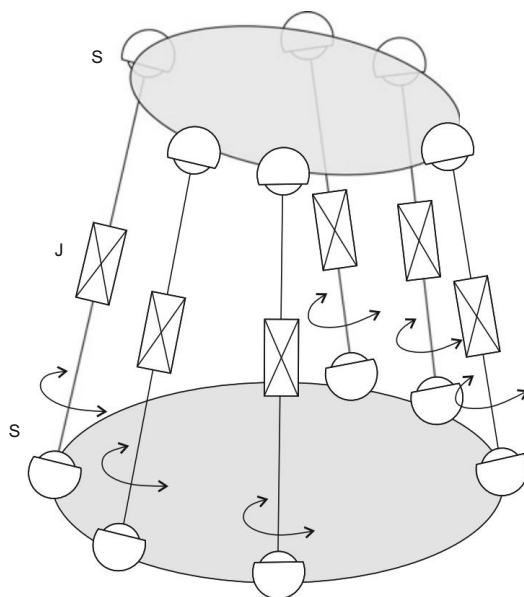


Fig. 6.10 Une modification de la plate-forme Stewart-Gough

ce qui correspond à -1 contraintes. Selon la formule de Grübler (6.5), le nombre de degrés de liberté du robot est

$$F = 6 - (-6) = 12.$$

Il est important de noter que six des douze degrés de liberté se manifestent par des rotations des jambes autour de leurs propres axes. Ces rotations n'ont aucune influence sur le mouvement de la plate-forme. Ainsi, le robot peut toujours être motorisé par seulement six moteurs qui modifient la longueur des jambes, affectant la translation T , tandis que les rotations autour des axes des jambes peuvent être laissées passives et peuvent changer librement. Les avantages de cette construction sont que les joints en S sont plus faciles à construire que les joints en U (et donc moins chers), et que les rotations passives autour des axes des jambes permettent une plus grande flexibilité lors de la connexion des câbles d'alimentation et de signal, car ceux-ci sont souvent disposés le long des jambes de la base à la plate-forme du robot.

Chapitre 7

Capteurs robotisés



Le système sensoriel humain comprend des capteurs de vision et d'ouïe, des capteurs kinesthésiques (mouvement, force et toucher), des capteurs de goût et d'odorat. Ces capteurs délivrent des signaux d'entrée au cerveau qui utilise ces informations sensorielles pour construire sa propre image de l'environnement et prend des décisions pour d'autres actions. Des exigences similaires sont également valables pour les mécanismes de robot. Cependant, en raison de la complexité de la détection humaine, la détection par robot est limitée à moins de capteurs.

L'utilisation de capteurs est d'une importance cruciale pour un fonctionnement efficace et précis du robot. Les capteurs du robot peuvent être généralement divisés en : (1) capteurs proprioceptifs évaluant les états internes du mécanisme du robot (positions, vitesses et couples dans les articulations du robot) ; et (2) des capteurs extéroceptifs délivrant au contrôleur les informations sur l'environnement du robot (capteurs de force, tactiles, de proximité et de distance, vision du robot).

7.1 Principes de détection

En général, les capteurs convertissent la grandeur physique mesurée en un signal électrique qui peut être sous une forme numérique évaluée par l'ordinateur. En robotique, nous nous intéressons principalement aux variables suivantes : position, vitesse, force et couple. Grâce à l'utilisation de transducteurs spéciaux, ces variables peuvent être converties en signaux électriques, tels que la tension, le courant, la résistance, la capacité ou l'inductance. Sur la base du principe de conversion, les capteurs peuvent être divisés comme suit :

- Capteurs électriques : la grandeur physique est directement transformée en un signal électrique ; de tels capteurs sont par exemple des potentiomètres ou des jauges de contrainte ;
- Capteurs électromagnétiques—utilisent le champ magnétique à des fins de variation physique conversion capable; un exemple est le tachymètre;

- Capteurs optiques—utilisent la lumière lors de la conversion des signaux ; un exemple d'un tel capteur est le codeur optique.

7.2 Capteurs de mouvement

Les capteurs typiques des mouvements du robot sont les potentiomètres, les encodeurs optiques et les tachymètres. Ils mesurent tous les mouvements du robot à l'intérieur de l'articulation du robot.

L'emplacement du capteur de mouvement dans l'articulation est important, ainsi que la manière de mesurer les paramètres de mouvement.

7.2.1 Placement des capteurs

Considérons d'abord un capteur de déplacement angulaire. Notre objectif est de mesurer l'angle dans une articulation de robot qui est actionnée par un moteur à travers un réducteur avec le rapport de réduction kr . En utilisant un réducteur, nous diminuons la vitesse angulaire articulaire du facteur kr par rapport à la vitesse angulaire du moteur. En même temps, le couple de l'articulation est augmenté du même facteur. Il est important que le capteur de mouvement soit placé avant ou après le réducteur. Le choix dépend des exigences de la tâche et du capteur utilisé. Dans un cas idéal, nous montons le capteur avant le réducteur (sur le côté du moteur), comme indiqué sur la Fig. 7.1. De cette façon, nous mesurons directement les rotations du moteur. La sortie du capteur doit ensuite être divisée par le rapport de réduction, pour obtenir l'angle d'articulation.

Notons θ la position angulaire du joint, m la position angulaire du moteur correspondant, et kr le rapport de réduction du réducteur. Lorsque le capteur

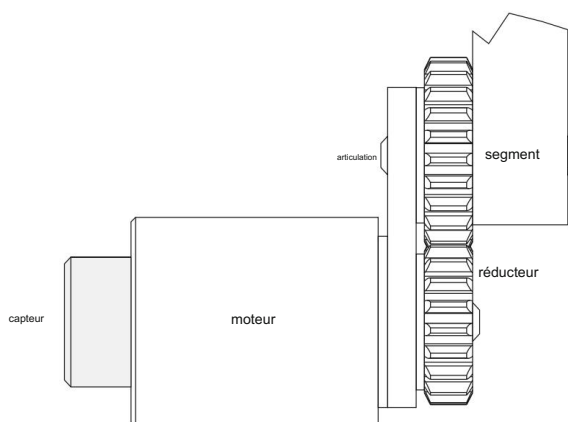


Fig. 7.1 Montage du capteur de mouvement avant le réducteur

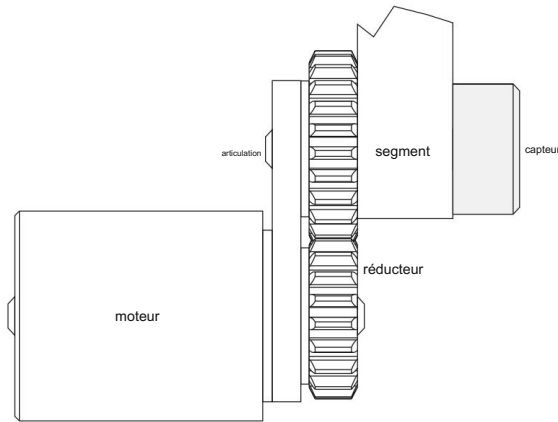


Fig. 7.2 Montage du capteur de mouvement derrière le réducteur

est placé avant le réducteur, sa sortie est égale à l'angle θ . La variable dont nous avons besoin à des fins de contrôle est l'angle d'articulation ϕ , qui est déterminé par le rapport

$$\phi = \frac{\theta}{kr} \quad (7.1)$$

En différenciant l'Eq. (7.1) par rapport à θ on a

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1}{kr} \quad \text{donc } d\phi = \frac{d\theta}{kr} \quad (7.2)$$

ce qui signifie que l'erreur de mesure du capteur est réduite du facteur kr .

L'avantage du placement du capteur avant le réducteur est d'obtenir des informations plus précises sur la position angulaire de l'articulation.

Une autre possibilité de montage du capteur est illustrée à la Fig. 7.2. Ici, le capteur est monté derrière le réducteur. De cette façon, les mouvements de l'articulation sont mesurés directement. La qualité du signal de commande est diminuée, car l'erreur de mesure du capteur (qui n'est plus réduite) entre directement dans la boucle de commande commune. Comme l'amplitude de mouvement de l'articulation est inférieure d'un facteur kr à celle du moteur, des capteurs avec une amplitude de mouvement plus petite peuvent être utilisés. Parfois, nous ne pouvons pas éviter de monter le capteur de mouvement dans l'axe de l'articulation. Il est donc important que nous soyons conscients de l'insuffisance d'un tel placement.

7.2.2 Potentiomètre

La figure 7.3 présente un modèle de potentiomètre rotatif et ses composants. Le potentiomètre se compose de deux parties : (1) enroulement résistif et (2) essuie-glace mobile.

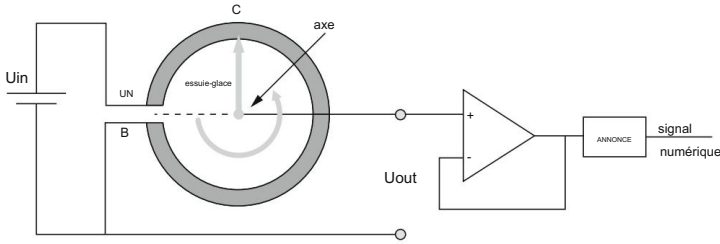


Fig. 7.3 Le modèle d'un potentiomètre

Le potentiomètre représente une méthode de mesure par contact, car le balai glisse le long de l'enroulement résistif circulaire.

Les potentiomètres sont généralement placés derrière le réducteur de manière à ce que l'axe du potentiomètre soit couplé à l'axe de l'articulation. Supposons que le point B représente la position de référence du potentiomètre appartenant à l'articulation. La résistance du potentiomètre le long de l'enroulement AB est égale à R , tandis que r représente la résistance de la partie CB de l'enroulement. L'angle du curseur par rapport à la position de référence B est noté (en radians). Lorsque la résistance le long de l'enroulement circulaire du potentiomètre est uniforme et que la distance entre les points A et B est négligeable, on a l'équation suivante

$$\frac{r}{R} = \frac{BC}{UNB} = \frac{\theta}{2\pi} \quad (7.3)$$

Supposons que le potentiomètre soit alimenté par la tension U_{in} . La tension de sortie mesurée sur le balai est égale à

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{r}{R} = \frac{\theta}{2\pi} \quad (7.4)$$

ou

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{2\pi} \cdot \theta \quad (7.5)$$

En mesurant la tension de sortie U_{out} , la position angulaire θ est déterminée.

7.2.3 Codeur optique

L'approche de mesure de contact de l'angle d'articulation du robot à l'aide de potentiomètres présente plusieurs lacunes. Le plus important est la durée de vie relativement courte en raison de l'usure élevée. De plus, le placement le plus adéquat est directement dans l'axe de l'articulation (derrière le réducteur) et non sur l'axe du moteur (avant le réducteur). Le

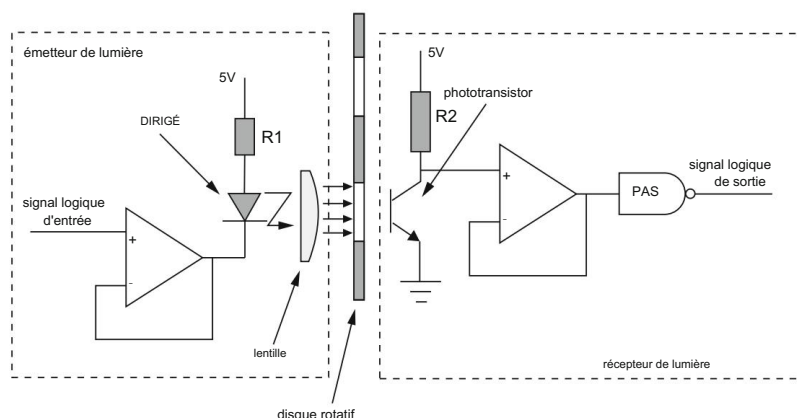


Fig. 7.4 Le modèle de codeur optique

Les capteurs de mouvement les plus utilisés en robotique sont donc les encodeurs optiques qui permettent une mesure sans contact.

Le codeur optique est basé sur la transformation du mouvement de l'articulation en une série d'impulsions lumineuses, qui sont ensuite converties en impulsions électriques. Pour générer les impulsions lumineuses, une source lumineuse est nécessaire, généralement une diode électroluminescente. La conversion de la lumière en impulsions électriques est réalisée par un phototransistor ou une photodiode convertissant la lumière en courant électrique.

Le modèle d'un codeur optique évaluant la position angulaire de l'articulation est présenté à la Fig. 7.4. Il se compose d'une source lumineuse avec lentille, d'un détecteur de lumière et d'un disque rotatif avec des fentes, qui est connecté à l'axe du moteur ou de l'articulation. Sur le disque rotatif, il y a une piste de fentes et d'espaces intermédiaires, qui alternativement transfèrent ou bloquent la lumière de la diode électroluminescente au phototransistor. La sortie logique du capteur est élevée lorsque la lumière traverse la fente et frappe le phototransistor de l'autre côté de la plaque tournante. Lorsque le chemin entre la diode électroluminescente et le phototransistor est bloqué par l'espace entre deux fentes, la sortie logique est faible.

Les codeurs optiques sont divisés en absolu et incrémental. Dans la suite du texte nous apprendrons leurs propriétés les plus importantes.

7.2.3.1 Codeur absolu

Le codeur optique absolu est un appareil qui mesure la position angulaire absolue d'une articulation. Sa sortie est un signal numérique. Dans un système numérique, chaque ligne de signal logique représente un bit d'information. Lors de la connexion de tous ces bits en une seule variable d'état logique, le nombre de tous les états logiques possibles détermine le nombre de toutes les positions angulaires absolues pouvant être mesurées par le codeur.

Supposons que l'on veuille mesurer la rotation angulaire de 360° avec le Le codeur absolu résolution de $0,1^\circ$. doit distinguer 3600 états logiques différents, ce qui signifie qu'il faut au moins 12 bits pour évaluer les angles articulaires avec la résolution requise. Avec 12 bits on peut représenter 4096 états logiques. Un paramètre de conception important des codeurs absolus est donc le nombre d'états logiques, qui dépend des exigences de la tâche et du placement du codeur (avant ou après le réducteur). Lorsque le codeur est placé devant un réducteur avec le rapport de réduction kr , la résolution de la mesure d'angle sera augmentée du facteur kr . Lorsque l'encodeur est derrière le réducteur, la résolution nécessaire de l'encodeur est directement déterminée par la résolution requise de la mesure de l'angle du joint. Tous les états logiques doivent être uniformément gravés dans le disque rotatif du codeur. Un exemple de codeur absolu à seize états logiques est illustré à la Fig. 7.5. Les seize états logiques peuvent être représentés par quatre bits. Les seize états logiques sont gravés sur la surface du disque rotatif. Le disque est dans le sens radial divisé en quatre pistes représentant les quatre bits. Chaque piste est divisée en seize segments correspondant aux états logiques. Comme l'information sur le déplacement angulaire est représentée par quatre bits, nous avons besoin de quatre paires de diodes électroluminescentes et de phototransistors (une paire pour chaque bit). Avec la rotation du disque, qui est connecté à l'axe du moteur ou de l'articulation, le signal de sortie changera selon les états logiques définis par l'ordre des segments (le code Gray, où deux valeurs successives diffèrent d'un seul bit, est généralement utilisé dans les codeurs absolus).

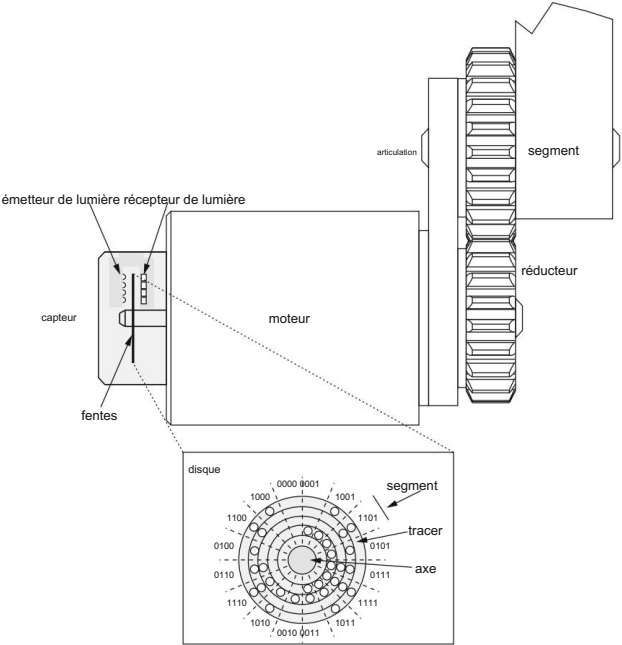


Fig. 7.5 Modèle de codeur absolu

Le codeur absolu ne détermine pas seulement la position angulaire de l'articulation mais également le sens de rotation.

7.2.3.2 Codeur incrémental

Contrairement aux codeurs absolus, les codeurs incrémentaux fournissent uniquement des informations sur les modifications de la position angulaire de l'articulation. Les avantages des codeurs incrémentaux par rapport aux codeurs absolus sont leur simplicité, leurs dimensions réduites et (surtout) leur faible coût. Ceci peut être réalisé en réduisant le nombre de pistes sur le disque rotatif à une seule piste. Au lieu d'avoir autant de pistes que le nombre de bits nécessaires à la représentation de tous les états logiques requis, nous n'avons plus qu'une seule piste avec une graduation paire des fentes le long du bord du disque.

La figure 7.6 montre un modèle de codeur incrémental. Une seule piste ne nécessite qu'une seule paire de diode électroluminescente et de phototransistor (paire optique). Pendant la rotation du disque codé, une série d'impulsions électriques est générée. La mesure du déplacement articulaire est basée sur le comptage de ces impulsions. Leur nombre est proportionnel au déplacement de l'articulation du robot. Le codeur incrémental illustré à la Fig. 7.6 génère huit impulsions à chaque rotation. La résolution de cet encodeur est

$$\Delta = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}. \quad (7.6)$$

En augmentant le nombre de fentes sur le disque, la résolution de l'encodeur est augmentée. En désignant le nombre de fentes par n_c , une équation générale pour la résolution du codeur peut être écrite

$$\Delta = \frac{2\pi}{n_c}. \quad (7.7)$$

Le codeur à une seule piste n'est capable d'évaluer que l'évolution de la position angulaire de l'articulation. Il ne peut pas fournir d'informations sur le sens de rotation ou la position absolue de l'articulation. Si l'on souhaite appliquer les codeurs incrémentaux à la commande de robots, il faut déterminer : (1) la position d'origine représentant la référence pour la mesure du changement de position de l'articulation et (2) le sens de rotation.

Le problème de la position d'origine est résolu en ajoutant une fente de référence supplémentaire sur le disque. Cette fente de référence est déplacée radialement par rapport à la piste à fente mesurant la position angulaire. Pour la détection de la position d'origine, une paire optique supplémentaire est nécessaire. Lors de la recherche de la fente de référence, le robot est programmé pour se déplacer à faible vitesse, tant que la fente de référence ou la position finale de l'amplitude de mouvement de l'articulation est atteinte. Dans ce dernier cas, le robot se déplace en sens inverse vers la fente de référence.

Le problème de la détermination du sens de rotation est résolu par une autre paire de diode électroluminescente et de phototransistor. Cette paire optique supplémentaire est déplacée tangentiellement et radialement de la première paire optique comme le montre la Fig. 7.6. Lorsque le disque

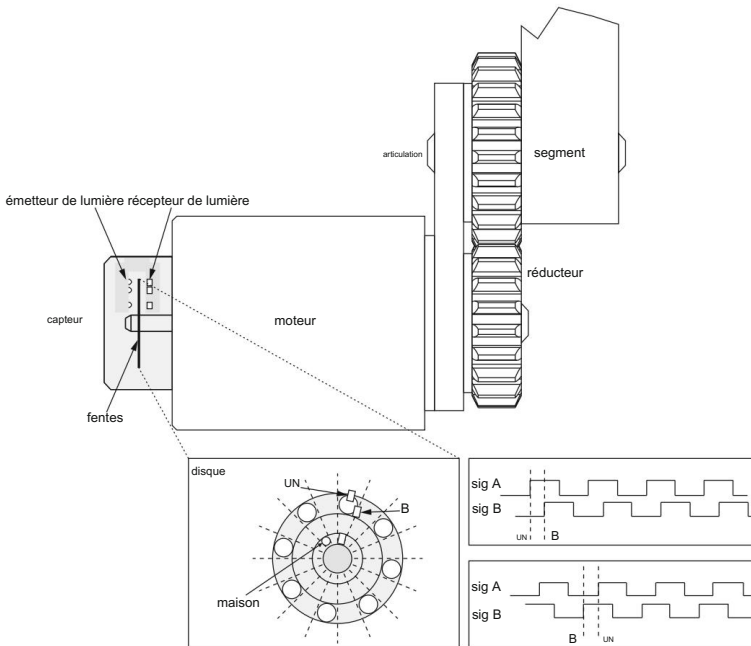


Fig. 7.6 Modèle de codeur incrémental. La série d'impulsions pour le sens de rotation positif (au-dessus) et négatif (au-dessous)

tourne, on obtient deux signaux qui sont, du fait du déplacement des paires optiques, déphasés. Ce décalage de phase se produit parce que chaque fente sur le disque atteint d'abord la première paire optique et après un court délai également la deuxième paire.

Les composants optiques sont généralement placés de manière à obtenir le déphasage de $\pi/2$ entre les deux signaux. Pendant la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, le signal B est en retard de phase de $\pi/2$ par rapport au signal A. Pendant la rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, le signal B est en avance de phase de $\pi/2$ par rapport au signal A (Fig. 7.6).

Le sens de rotation du codeur peut être déterminé sur la base des déphasages entre les signaux A et B. Un autre avantage d'avoir deux paires optiques est la possibilité de compter tous les changements dans les deux signaux A et B. L'approche connue sous le nom de décodage en quadrature permet une résolution de mesure quatre fois supérieure à la résolution nominale du codeur.

7.2.4 Encodeur magnétique

Contrairement aux encodeurs optiques, l'encodeur magnétique utilise un champ magnétique pour mesurer la position. Ceci peut être réalisé en utilisant une série de pôles magnétiques (2 ou plus) sur le rotor du capteur pour représenter la position de l'encodeur sur un capteur magnétique. Le rotor tourne

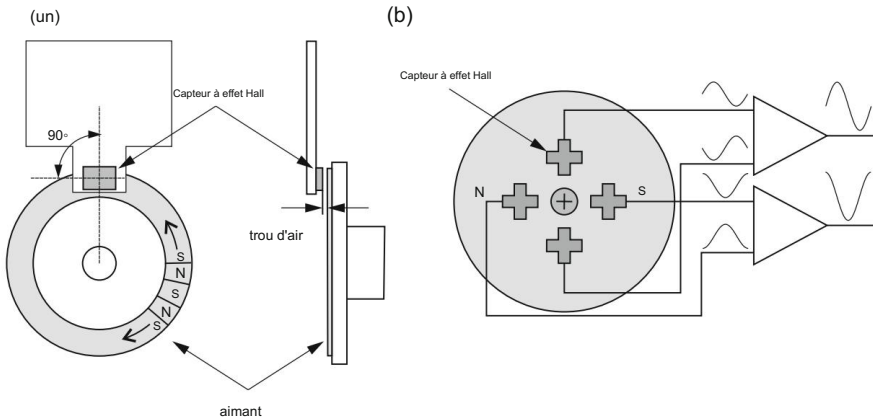


Fig. 7.7 Modèle de codeur magnétique : a capteur à effet Hall et pôles nord et sud alternés et b plusieurs capteurs à effet Hall à aimant rotatif diamétralement aimanté

avec l'arbre et contient une alternance de pôles nord et sud régulièrement espacés autour de sa circonférence. Le capteur magnétique (généralement magnéto-résistif ou à effet Hall) lit les positions des pôles magnétiques. Les capteurs Hall génèrent une tension de sortie proportionnelle à la force d'un champ magnétique appliqué. Les capteurs magnéto-résistifs détectent les changements de résistance provoqués par un champ magnétique. Le principe de fonctionnement est illustré à la Fig. 7.7a.

Les capteurs à effet Hall peuvent également être utilisés pour la mesure d'angle lorsqu'ils sont placés à proximité d'un aimant magnétisé diamétralement qui génère une forme d'onde sinusoïdale. La limitation de cette méthode est l'ambiguïté aux angles $> 90^\circ$ dans les deux sens à partir du point de passage par zéro. Afin d'étendre la plage de mesure à 360° , une méthode, raffinement de la est nécessaire. Le problème peut être résolu en utilisant plusieurs capteurs Hall, plutôt qu'un seul, et en les plaçant sous un aimant rotatif diamétralement magnétisé pour générer plusieurs formes d'onde sinusoïdales. La figure 7.7b montre quatre capteurs Hall équidistants générant quatre signaux sinusoïdaux, chacun déphasé de 90° par rapport à son voisin. Les encodeurs magnétiques sont généralement plus robustes que les encodeurs optiques.

7.2.5 Tachymètre

Le signal de la vitesse articulaire peut être obtenu par différenciation numérique du signal de position. Néanmoins, la mesure directe de la vitesse articulaire à l'aide d'un tachymètre est souvent utilisée en robotique. La raison en est le bruit introduit par la différenciation numérique, qui peut grandement affecter la qualité du contrôle du robot.

Les tachymètres peuvent être divisés en : (1) tachymètres à courant continu (CC) et (2) tachymètres à courant alternatif (CA). En robotique, ce sont généralement les tachymètres CC les plus simples qui sont utilisés. Le principe de fonctionnement est basé sur un générateur de courant continu dont le champ magnétique est fourni par des aimants permanents. Le champ magnétique étant constant, la tension de sortie du tachymètre est proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor. Étant donné que les commutateurs sont utilisés dans les tachymètres CC, une légère ondulation apparaît dans la tension de sortie, qui ne peut pas être entièrement filtrée. Cette lacune, ainsi que d'autres imperfections, est évitée en utilisant des tachymètres à courant alternatif.

7.2.6 Unité de mesure inertielle

Des potentiomètres et des codeurs optiques mesurent les déplacements des articulations dans les mécanismes de robots. Si l'on considère, par exemple, un véhicule aérien robotisé, ou un robot à roues, ces capteurs ne fournissent pas d'informations sur l'orientation du dispositif dans l'espace.

La mesure de l'orientation d'un objet (robot) dans l'espace est généralement basée sur le principe magnéto inertielle. Cette méthode combine un gyroscope (capteur de vitesse angulaire), un accéléromètre (capteur d'accélération linéaire) et un magnétomètre (mesure l'orientation par rapport au champ magnétique terrestre et n'est pas considéré comme un capteur inertielle).

La méthode sera illustrée par l'exemple d'un pendule rigide équipé d'un accéléromètre à deux axes (mesure des accélérations selon deux axes perpendiculaires) et d'un gyroscope à un axe (Fig. 7.8). Les deux capteurs donnent les grandeurs mesurées dans leurs propres cadres de coordonnées, qui sont attachés au centre du capteur et ont leurs axes parallèles aux axes x et y du cadre de coordonnées attaché au pendule. La figure 7.8a montre un pendule stationnaire tandis que la figure 7.8b montre un pendule oscillant. On s'intéresse à l'orientation du pendule par rapport au repère de coordonnées x 0 – y 0 – z 0 . Puisque le pendule oscille uniquement autour de l'axe z , nous ne sommes réellement intéressés que par l'angle .

Nous analysons d'abord les conditions stationnaires. Puisque la vitesse angulaire d'un pendule stationnaire est égale à zéro, la sortie du gyroscope est également nulle et le gyroscope ne nous dit rien sur l'orientation du pendule. Cependant, nous pouvons voir que l'accéléromètre mesure toujours l'accélération gravitationnelle. L'accéléromètre étant à un angle par rapport au champ gravitationnel, deux composantes d'accélération sont mesurées : a_x et a_y .

La somme vectorielle des deux composantes donne l'accélération gravitationnelle. La figure 7.8a montre que l'angle entre les vecteurs g et a_y est égal à . Puisque les valeurs scalaires des accélérations a_x et a_y sont connues, nous pouvons maintenant déterminer l'angle du pendule

$$\theta = \arctan \frac{a_x}{a_y} . \quad (7.8)$$

L'accéléromètre permet ainsi de mesurer l'angle du pendule en conditions stationnaires. Pour cette raison, les accéléromètres sont fréquemment utilisés comme inclinomètres.

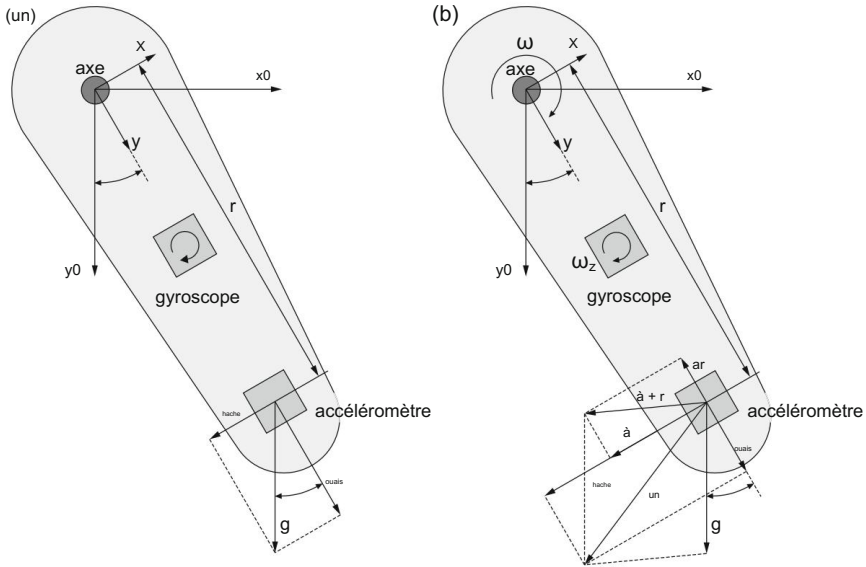


Fig. 7.8 Exemple d'utilisation d'un système de mesure inertielle pour mesurer l'angle d'un pendule :
figure de gauche—pendule stationnaire, figure de droite—pendule oscillant

Les conditions dans un pendule oscillant sont assez différentes. Puisque le balancement est un mouvement de rotation accéléré, l'accéléromètre est affecté non seulement par le accélération gravitationnelle g , mais aussi par accélération centripète

$$ar = \omega \times (\omega \times r) \quad (7.9)$$

et accélération tangentielle

$$\dot{a} = \omega' \times r. \quad (7.10)$$

L'accélération totale agissant sur l'accéléromètre est donc

$$une = g + ar + \dot{a}. \quad (7.11)$$

L'équation utilisée pour calculer l'angle en conditions stationnaires (7.8) n'est plus valable, par conséquent, l'accéléromètre ne peut pas être utilisé pour calculer l'angle d'un pendule oscillant. Cependant, la sortie du gyroscope, qui mesure la vitesse angulaire du pendule, est désormais également disponible. Comme l'angle du pendule peut être calculée comme l'intégrale temporelle de la vitesse angulaire, la relation suivante peut être déclaré

$$= 0 + \omega dt, \quad (7.12)$$

où l'orientation initiale du pendule 0 doit être connue.

L'exemple donné montre clairement qu'un accéléromètre convient aux mesures d'orientation dans des conditions statiques ou quasi-statiques tandis qu'un gyroscope convient aux mesures d'orientation dans des conditions dynamiques. Cependant, deux faiblesses des accéléromètres et des gyroscopes doivent être mentionnées. Un accéléromètre ne peut pas être utilisé pour mesurer des angles dans un plan horizontal, car la sortie du capteur est nulle lorsque son axe est perpendiculaire à la direction de la gravité.

Pour cela, on peut utiliser un magnétomètre, qui permet également de mesurer la rotation autour du vecteur champ de gravité (pensez au fonctionnement d'une boussole). De plus, ni la sortie du gyroscope ni celle de l'accéléromètre ne sont idéales. En plus de la quantité mesurée, la sortie comprend un décalage et du bruit. L'intégration du décalage provoque une dérive linéaire, donc Eq. (7.12) ne donne pas une mesure précise de l'orientation du pendule. En raison des faiblesses des capteurs individuels, il est courant de combiner trois accéléromètres perpendiculaires, trois gyroscopes perpendiculaires et trois magnétomètres perpendiculaires en un seul système, appelé unité de mesure magnéto-inertielle (IMU). La combinaison des meilleures propriétés d'un accéléromètre, d'un gyroscope et d'un magnétomètre peut donner une mesure précise et fiable de l'orientation spatiale.

La vitesse angulaire mesurée par le gyroscope est intégrée, donnant une estimation de l'orientation. Les mesures de l'accéléromètre et du magnétomètre sont utilisées pour calculer directement l'orientation du capteur en référence aux vecteurs de gravité et de champ magnétique. Ceci est réalisé grâce à la fusion de capteurs, ce qui peut être fait en utilisant le filtre de Kalman.

7.3 Capteurs de contact

Les capteurs considérés jusqu'à présent fournissent des informations sur la pose et le mouvement du robot. Ils permettent de fermer la boucle d'asservissement de position et de vitesse. Dans certaines tâches de robot, le contact de l'effecteur terminal avec l'environnement est requis. Les capteurs de contact typiques utilisés en robotique sont les capteurs tactiles et les capteurs de force et de couple. Les capteurs tactiles mesurent les paramètres qui définissent le contact entre le capteur et un objet.

La détection consiste à mesurer une force de contact ponctuelle et la répartition spatiale des forces perpendiculaires à une surface. En revanche, les capteurs de force et de couple mesurent les forces totales appliquées à un objet.

7.3.1 Capteur tactile

Les robots peuvent également collecter des informations sur l'environnement par le toucher. Afin d'augmenter les capacités de manipulation du robot, des capteurs tactiles peuvent être utilisés dans les doigts robotiques, comme illustré à la Fig. 7.9a. Le capteur fournit des données sur la répartition de la force de contact entre le doigt et l'objet manipulé. Pour augmenter la sécurité du robot (par exemple, lorsque

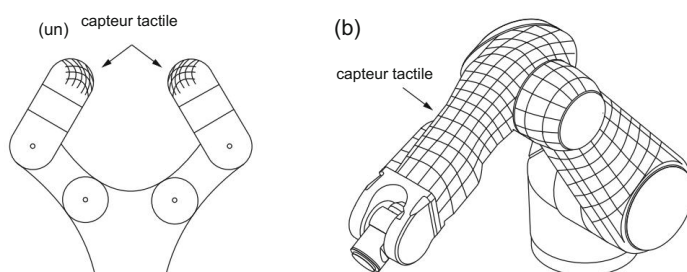


Fig. 7.9 Capteur tactile utilisé dans le doigt du robot (à gauche) et comme peau du robot (à droite)

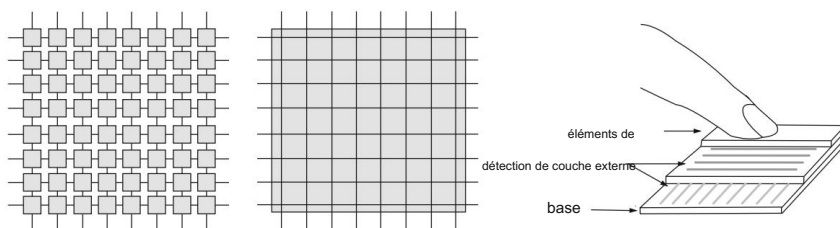


Fig. 7.10 Un modèle de capteur tactile

travaillant avec un humain), les capteurs tactiles peuvent être utilisés comme une peau de robot artificielle qui permet au robot de détecter les contacts avec des objets dans l'environnement (Fig. 7.9b).

La détection tactile est basée sur un ensemble de capteurs tactiles, comme illustré à la Fig. 7.10. Les principes de détection suivants peuvent être mis en œuvre dans le réseau :

- capteurs basés sur la déformation — la surface du matériau se déforme (change de longueur) lorsqu'elle est soumise à des forces externes ; la déformation est convertie en signaux électriques avec des jauges de contrainte connectées dans un pont de Wheatstone ;
 - capteurs résistifs — la résistance électrique change avec la pression d'un matériau placé entre deux électrodes ; • capteurs capacitifs
- l'élément de détection est un condensateur dont la capacité change avec la force appliquée ; la force peut produire soit une modification de la distance entre les plaques du condensateur, soit sa surface ;

- capteurs optiques — la détection est généralement basée sur la mesure de l'intensité lumineuse ; l'intensité de la lumière peut être modulée en déplaçant un obstacle ou une surface réfléchissante dans le trajet de la lumière ; l'intensité de la lumière reçue est fonction du déplacement et donc de la force appliquée ; • capteurs

piézoélectriques — les matériaux, comme le quartz, ont des propriétés piézoélectriques et peuvent donc être utilisés pour la détection tactile ; les transducteurs piézoélectriques ne sont pas adaptés à la transduction de force statique ; ce problème peut être surmonté en faisant vibrer le capteur et en détectant la différence de fréquence de vibration due à la force appliquée ;

- capteurs magnétiques — les changements de densité de flux magnétique ou de couplage magnétique entre les circuits sont les principes les plus largement utilisés dans la détection tactile magnétique ;
- capteurs mécaniques—les éléments de détection sont des micro-interrupteurs mécaniques et hors états.

7.3.2 Interrupteur de fin de course et pare-chocs

Les interrupteurs de fin de course sont souvent utilisés pour contrôler les mécanismes du robot. Ils peuvent détecter une seule position d'une pièce mobile et sont donc adaptés pour garantir que le mouvement ne dépasse pas une limite prédéfinie. Un capteur de pare-chocs, un type spécial d'interrupteur de fin de course, par exemple, indiquera au robot s'il est en contact avec un objet physique ou non.

Si le capteur est monté sur le pare-chocs avant d'un robot mobile, le robot pourrait utiliser cette information pour dire s'il a heurté un obstacle, comme un mur (Fig. 7.11).

Les aspirateurs robotiques s'appuient généralement sur des capteurs de pare-chocs pour naviguer à l'intérieur de l'environnement domestique.

7.3.3 Capteur de force et de couple

Dans le cas le plus simple la mesure de force permet de déconnecter le robot lorsque la force de contact dépasse une limite de sécurité prédéterminée. Dans un cas plus sophistiqué, nous utilisons des capteurs de force pour contrôler la force entre l'effecteur du robot et l'environnement. Il n'est donc pas difficile de réaliser que le capteur de force est placé dans le poignet du robot et est donc souvent appelé capteur de poignet.

Les jauges de contrainte sont généralement utilisées pour les mesures de force. La jauge de contrainte est fixée à une poutre élastique qui se déforme sous la contrainte provoquée par la force appliquée. La jauge de contrainte se comporte donc comme une résistance variable dont la résistance évolue proportionnellement à sa déformation. Le capteur de poignet ne doit pas influencer la

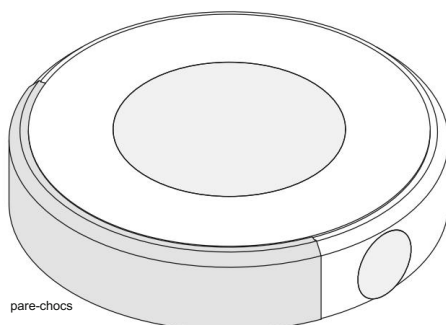


Fig. 7.11 Capteurs de pare-chocs à utiliser sur un robot mobile

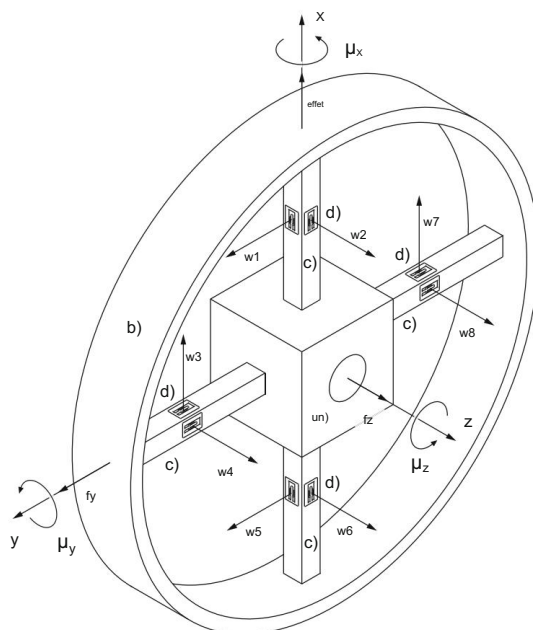


Fig. 7.12 Modèle du capteur de force et de couple : un corps rigide en contact avec l'effecteur du robot, b un anneau rigide en contact avec l'environnement du robot, c des poutres élastiques et d une jauge de contrainte

interaction du robot avec l'environnement. Cela signifie que le capteur de poignet doit être suffisamment rigide. Les capteurs du poignet du robot sont généralement conçus comme illustré à la Fig. 7.12. La structure du capteur est basée sur trois composants : (a) une partie interne rigide qui est en contact avec l'effecteur terminal du robot ; (b) un anneau externe rigide qui est en contact avec l'environnement du robot ; et (c) des poutres élastiques interconnectant l'anneau extérieur et l'anneau intérieur. Lors du contact du robot avec l'environnement, les poutres sont déformées par les forces extérieures ce qui provoque une modification de la résistance des jauges de contrainte.

Le vecteur des forces et des couples agissant au niveau de l'effecteur du robot se trouve dans l'espace tridimensionnel représenté par six éléments, trois forces et trois couples.

La section rectangulaire d'une poutre (représentée à la Fig. 7.12) permet de mesurer les déformations dans deux directions. Pour mesurer les six éléments du vecteur force et couple, au moins trois faisceaux, non colinéaires, sont nécessaires. Quatre faisceaux sont utilisés dans l'exemple de la Fig. 7.12. Deux jauges de contrainte sont fixées aux surfaces perpendiculaires de chaque poutre. Ayant huit jauges de contrainte, il y a huit résistances variables, R_1 à R_8 . Comme conséquence des forces et couples externes, des déformations élastiques w_1 à w_8 se produisent, entraînant des changements dans les résistances ΔR_1 à ΔR_8 . Les petites variations de la résistance sont, grâce à l'utilisation du pont de pierre de blé, converties en signaux de tension (Fig. 7.13). A chacune des huit variables

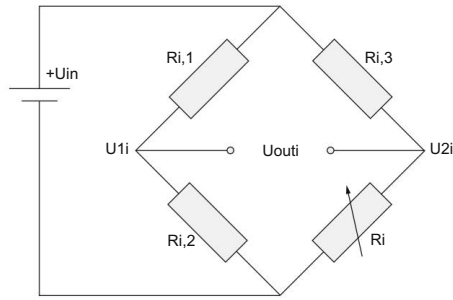


Fig. 7.13 Le pont de Wheatstone

résistances $\{R1 \dots R8\}$, trois résistances supplémentaires sont ajoutées. Les trois résistances sont, avec la jauge de contrainte, connectées au pont de mesure. Le pont est alimenté par la tension U_{in} , tandis que la tension de sortie U_{outi} est déterminée par la différence $U_{1i} - U_{2i}$. La tension U_{1i} est

$$U_{1i} = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} U_{in}, \quad (7.13)$$

tandis que la tension U_{2i} est

$$U_{2i} = U_{in} \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} \quad (7.14)$$

La tension de sortie est égale à

$$U_{outi} = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} - \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} U_{in}. \quad (7.15)$$

En différenciant l'Eq. (7.15) par rapport à la variable R_i , l'influence de la variation de la résistance de la jauge de contrainte sur la tension de sortie peut être déterminée

$$\Delta U_{outi} = - \frac{R_{i,3} U_{in}}{(R_i + R_{i,3})^2} \Delta R_i. \quad (7.16)$$

Avant application, le capteur de force doit être étalonné, ce qui nécessite la détermination d'une matrice d'étalonnage 6×8 transformant les six tensions de sortie en trois forces $f_x \ f_y \ f_z$ et trois couples $\mu_x \ \mu_y \ \mu_z$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix}^J = K \begin{bmatrix} U_{out1} \\ U_{out2} \\ U_{out3} \\ U_{out4} \\ U_{out5} \\ U_{out6} \\ U_{out7} \\ U_{out8} \end{bmatrix}^J, \quad (7.17)$$

où

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & K_{13} & 0 & 0 & K_{17} & 0 \\ 21 & 0 & 0 & 0 & K_{25} & 0 & 0 \\ 0 & K_{32} & 0 & 0 & K_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{52} & 0 & 0 & 0 & K_{56} & 0 \\ K_{61} & 0 & 0 & 0 & K_{63} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(7.18)

est la matrice de calibration à valeurs constantes K_{ij} .

7.3.4 Capteur de couple d'articulation

Il est souvent nécessaire ou préférable de mesurer les couples articulaires au lieu des forces de l'effecteur terminal du robot. Dans de tels cas, un capteur de couple commun doit être utilisé. En mesurant les couples articulaires, le robot peut répondre aux forces appliquées n'importe où sur son mécanisme. Si le modèle dynamique du robot est connu, il est également possible d'estimer les forces de l'effecteur terminal.

A titre d'exemple, considérons l'Eq. (5.20). L'inverse de cette équation donnerait

$$f = J^{-T}(q)\tau.$$

(7.19)

Il convient de noter que l'équation ci-dessus donnerait des forces effectrices exactes uniquement dans des conditions statiques et si la force de gravité n'affecte pas les couples articulaires. Dans d'autres conditions, le modèle dynamique du robot (5.56) doit être pris en compte.

Le principe de fonctionnement du capteur de couple est typiquement similaire à celui du capteur de poignet. Cependant, sa structure mécanique est conçue pour s'adapter à l'axe de l'articulation.

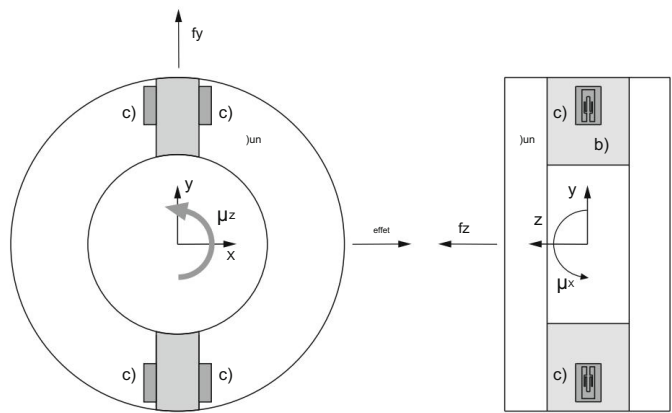


Fig. 7.14 La structure du capteur de couple articulaire mesure le couple μ_z : a cadre, b élément élastique et c jauge de contrainte

Ainsi, le capteur est intégré entre l'actionneur (et éventuellement l'engrenage) et le segment de robot. Le capteur doit garantir une sensibilité élevée à la torsion, une faible sensibilité aux composants non torsionnels et une rigidité élevée dans tous les axes de forces et de moments.

La déformation de la structure mécanique due au couple de l'articulation est mesurée à l'aide de jauges de contrainte. Une représentation schématique du capteur de couple articulaire est illustrée à la Fig. 7.14.

7.4 Capteurs de proximité et de télémétrie

Les capteurs de proximité et de distance détectent la présence d'objets à proximité sans aucun contact physique. Consécutivement, ils permettent de faire la distinction entre des obstacles de différentes formes et tailles ainsi qu'un évitement d'obstacles plus efficace que les capteurs de contact. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour détecter les obstacles à distance. Les méthodes basées sur les principes magnétiques et capacitifs permettent généralement de détecter la proximité d'un objet mais pas sa distance. Lorsque la distance est pertinente, des méthodes actives telles que le télémètre à ultrasons, le télémètre laser et le capteur de proximité infrarouge ainsi que des méthodes passives basées sur des caméras peuvent être envisagées. Toutes les méthodes se caractérisent par une grande fiabilité et une longue durée de vie car elles fonctionnent sans contact physique entre le capteur et l'objet détecté.

7.4.1 Télémètre à ultrasons

Un télémètre à ultrasons mesure la distance à un objet en utilisant des ondes sonores.

La distance est mesurée en envoyant une onde sonore à une fréquence ultrasonore (les fréquences plus élevées sont meilleures pour les besoins de courte portée et de haute précision) et en écoutant cette onde sonore rebondir (Fig. 7.15a). Le temps écoulé entre la génération de l'onde sonore et le rebond de l'onde sonore est utilisé pour calculer la distance entre le capteur et l'objet (en considérant que la vitesse du son dans l'air est d'environ 343 m/s).

La compréhension de la zone de détection est importante pour réussir la détection et l'évitement des objets. La largeur du faisceau du télémètre à ultrasons est généralement décrite comme un cône d'un certain angle. Cet angle décrit l'arc auquel l'onde ultrasonore émane du transducteur. Cependant, à une certaine distance, le taux d'expansion commence à diminuer, comme le montre la figure 7.15b. Une extension de la zone de mesure d'un télémètre à ultrasons peut être obtenue en utilisant plusieurs capteurs faisant face à des angles différents (Fig. 7.15c). Le problème de la diaphonie doit être pris en compte dans ce cas.

Différents autres facteurs affectent les performances d'un télémètre à ultrasons. La taille, la composition, la forme et l'orientation des objets doivent être prises en compte. Dans les cas présentés dans les images supérieures de la Fig. 7.16, les mesures sont normalement correctes, tandis que dans les scénarios présentés dans les images inférieures de la Fig. 7.16, le télémètre à ultrasons donnerait de faux résultats.

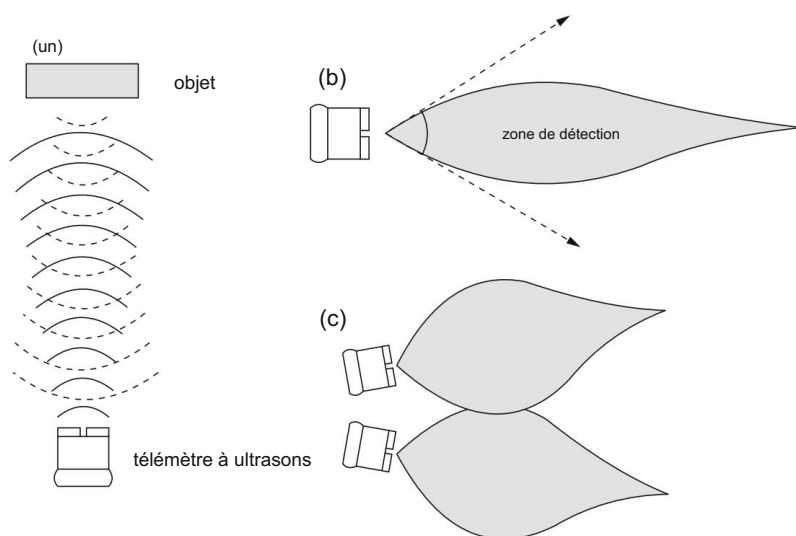


Fig. 7.15 Télémètre à ultrasons : a principe de fonctionnement, b zone de détection et c association de plusieurs capteurs

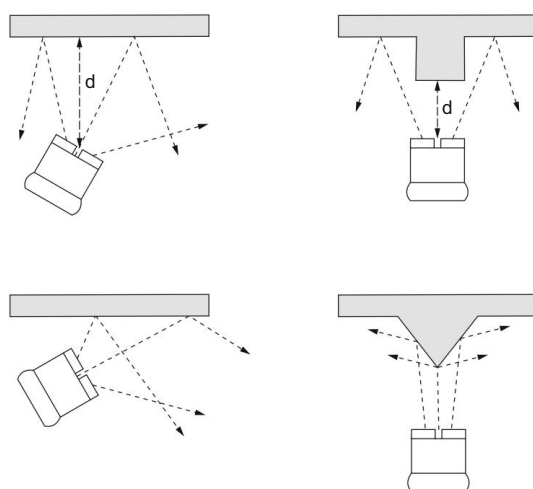


Fig. 7.16 Mesure de distance par télémètre à ultrasons et limitations : mesures correctes de la distance d (rangée supérieure) et résultats erronés (rangée inférieure)

7.4.2 Télémètre laser et scanner laser

Un télémètre laser utilise un faisceau laser pour déterminer la distance à un objet. La forme la plus courante de télémètre laser fonctionne selon le principe du temps de vol. La distance peut être déterminée en mesurant le temps nécessaire à l'impulsion laser pour revenir au

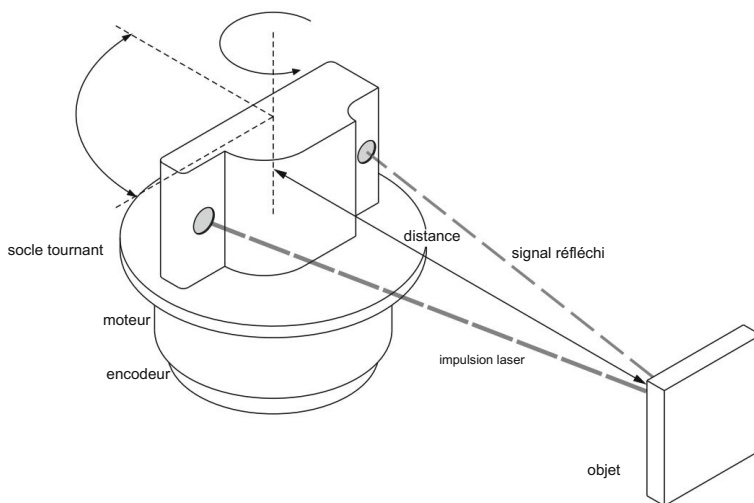


Figure 7.17 Scanner laser

capteur et cela nécessite une mesure précise du temps. Avec la vitesse de la lumière connue et une mesure précise du temps pris, la distance peut être calculée. Une autre possibilité consiste à calculer le déphasage des ondes lumineuses en analysant la lumière entrante et en la comparant à un signal de référence. La méthode la plus précise pour mesurer les changements de distance plutôt que les distances absolues est l'interférométrie.

Le télémètre laser mesure la distance d'un objet à la fois. Il s'agit donc d'un capteur unidimensionnel. Le scanner laser utilise un laser qui balaie le champ de vision du capteur. Comme son nom l'indique, l'instrument se compose principalement d'un laser et d'un scanner. Les distances sont mesurées comme avec le télémètre laser. Le scanner laser produit un réseau de points en échantillonnant l'environnement à un rythme élevé. Ceci est généralement réalisé en utilisant des assemblages rotatifs ou des miroirs rotatifs pour balayer 360 degrés autour de l'environnement. Le principe de fonctionnement du scanner laser est illustré à la Fig. 7.17.

Les points échantillonnés représentent les positions des objets par rapport au capteur. La génération d'un tableau de points est présentée dans la Fig. 7.18. La distance d_L est mesurée à l'aide du laser et l'angle de rotation L est généralement mesuré à l'aide d'un codeur sur l'ensemble rotatif. Les points sont donc définis en coordonnées polaires. Elles peuvent être transformées en coordonnées cartésiennes (x_L, y_L) relatives au capteur avec

$$x_L = d_L \cos L \quad \text{et} \quad y_L = d_L \sin L. \quad (7.20)$$

Les points échantillonnés peuvent être utilisés pour générer une carte de l'environnement, pour la planification de trajectoires et l'évitement d'obstacles. Un scanner tridimensionnel (3-D) permet de numériser

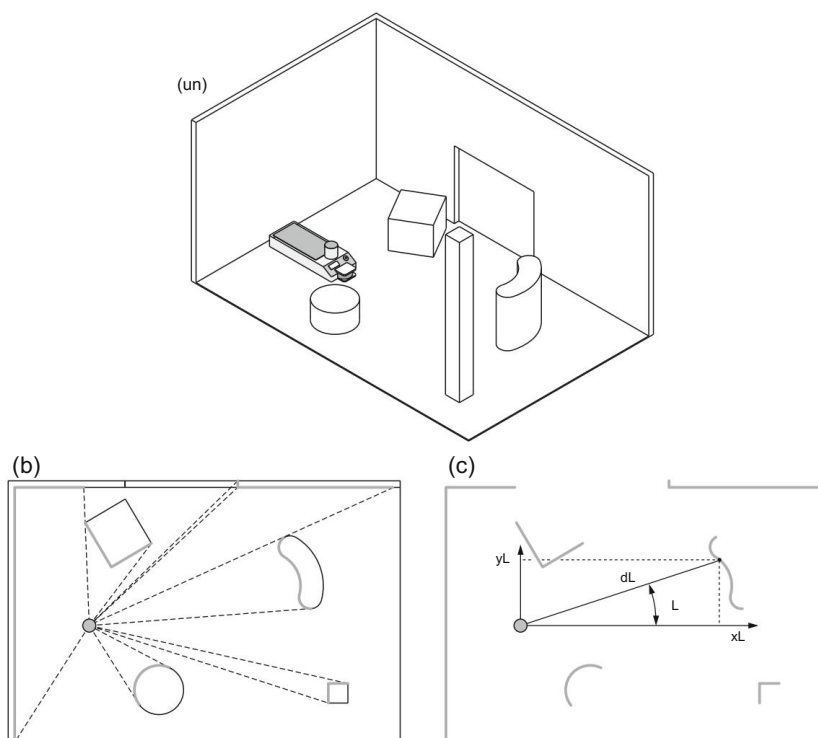


Fig. 7.18 Scanner laser utilisé pour créer une carte de l'environnement : a environnement, b numérisation et c carte

un espace 3D complet et en collectant des données de nuage de points 3D en utilisant un autre degré de liberté au niveau de l'assemblage en rotation. Ces scanners laser 3D sont généralement appelés LiDAR (Light Detection And Ranging) et sont souvent utilisés dans des véhicules autonomes pour scanner l'environnement.

Chapitre 8

Vision robotique



La tâche de la vision robotique est de reconnaître la géométrie de l'espace de travail du robot à partir d'une image numérique. Notre objectif est de trouver la relation entre les coordonnées d'un point dans l'image bidimensionnelle (2D) et les coordonnées du point dans l'environnement réel du robot tridimensionnel (3D).

8.1 Configuration du système

Le système de vision du robot est basé sur l'utilisation d'une, deux ou plusieurs caméras. Si plusieurs caméras sont utilisées pour observer le même objet, des informations sur la profondeur de l'objet peuvent être dérivées. Dans ce cas, on parle de vision 3D ou stéréo. Bien sûr, la vue 3D peut également être réalisée avec une seule caméra si deux images de l'objet sont disponibles, capturées à partir de poses différentes. Si une seule image est disponible, la profondeur peut être estimée sur la base de certaines propriétés géométriques précédemment connues de l'objet.

Lors de l'analyse de la configuration du système de vision robotique, il est nécessaire de faire la distinction entre les emplacements possibles des caméras. Les caméras peuvent être placées dans une configuration fixe, où elles sont montées de manière rigide dans la cellule de travail, ou dans une configuration mobile, où la caméra est fixée à un robot. Dans la première configuration, la caméra observe les objets à partir d'une position fixe par rapport au cadre de coordonnées de base du robot. Le champ de vision de la caméra ne change pas pendant l'exécution de la tâche, ce qui signifie que la précision de la mesure est fondamentalement constante. Dans certaines tâches, il est difficile d'empêcher le manipulateur d'atteindre le champ de vision de la caméra et d'occulter ainsi les objets. Par conséquent, dans ce cas, il est nécessaire de mettre une caméra sur un robot (en configuration mobile).

La caméra peut être fixée avant ou après le poignet du robot. Dans le premier cas, la caméra observe la situation depuis une position favorable et le manipulateur n'occulte généralement pas son champ de vision. Dans le second cas, la caméra est fixée à l'effecteur du robot et n'observe généralement que l'objet manipulé.

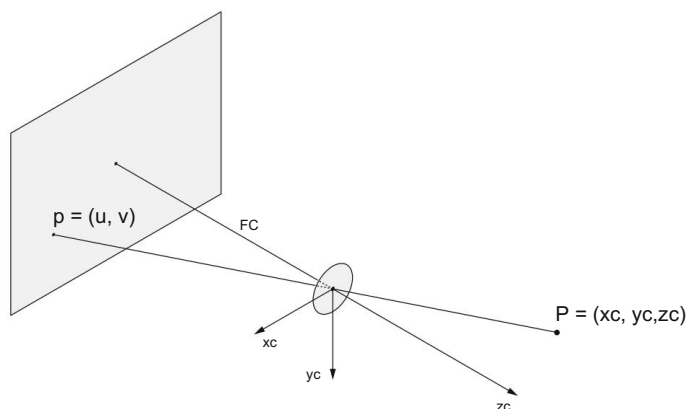


Figure 8.1 Projection en perspective

ulé. Dans les deux cas, le champ de vision de la caméra change avec les mouvements du manipulateur. Lorsque le manipulateur s'approche de l'objet, la précision de la mesure augmente généralement.

8.2 Projection vers l'avant

Les équations de base de l'optique déterminent la position d'un point dans le plan image par rapport au point correspondant dans l'espace 3D (Fig. 8.1). On trouvera donc la relation géométrique entre les coordonnées du point $P = (x_c, y_c, z_c)$ dans l'espace et les coordonnées du point $p = (u, v)$ dans l'image.

Comme l'ouverture des objectifs de la caméra, à travers laquelle la lumière tombe sur le plan image, est petite par rapport à la taille des objets manipulés par le robot, nous pouvons remplacer les objectifs de notre modèle mathématique par un simple trou d'épingle. Dans la projection en perspective, les points de l'espace sont projetés sur le plan de l'image par des lignes se coupant en un point commun appelé centre de projection. Lors du remplacement d'une vraie caméra par une caméra à sténopé, le centre de projection est situé au centre des objectifs.

Lors de l'étude de la géométrie et de la cinématique du robot, nous avons attaché un cadre de coordonnées à chaque corps rigide (par exemple, à des segments de robot ou à des objets manipulés par le robot). Lorsque l'on considère la vision du robot, la caméra elle-même représente un corps rigide et un cadre de coordonnées doit lui être attribué. La pose de la caméra sera désormais décrite par un repère de coordonnées correspondant. L'axe z_c du cadre de la caméra est dirigé le long de l'axe optique, tandis que l'origine du cadre est positionnée au centre de la projection. On choisira un repère droitier où l'axe x_c est parallèle aux lignes du capteur imageur et l'axe y_c est parallèle à ses colonnes.

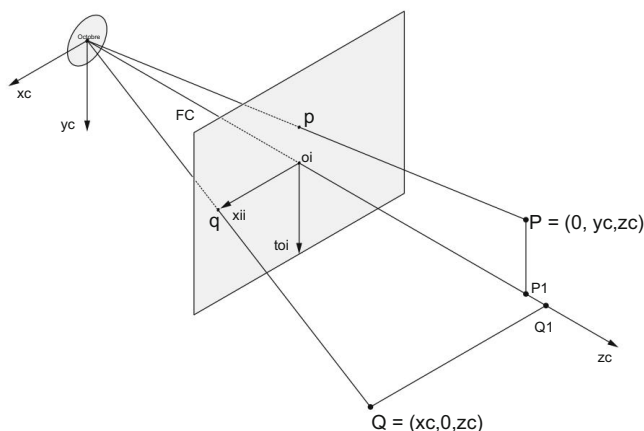


Fig. 8.2 Plan image équivalent

Le plan image est dans la caméra, qui est placée derrière le centre de projection. La distance fc entre l'image et le centre de projection s'appelle la distance focale. Dans le cadre de la caméra, la distance focale a une valeur négative, car le plan image intercepte l'axe zc négatif. Il est plus pratique d'utiliser le plan image équivalent placé à une valeur zc positive (Fig. 8.2). Le plan image équivalent et le plan image réel sont symétriques par rapport à l'origine du cadre de la caméra. Les propriétés géométriques des objets sont équivalentes dans les deux plans et ne diffèrent que par le signe.

Dorénavant nous appellerons le plan image équivalent simplement le plan image. De plus, le plan image peut être considéré comme un corps rigide auquel un cadre de coordonnées doit être attaché. L'origine de ce cadre est placée à l'intersection de l'axe optique avec le plan image. Les axes x_i et y_i sont parallèles aux axes x_c et y_c du cadre de la caméra.

De cette façon, la caméra a deux cadres de coordonnées, le cadre de la caméra et le cadre de l'image. Soit le point P exprimé dans le cadre de la caméra, tandis que le point p représente sa projection sur le plan image. Notre but est de trouver les relations entre les coordonnées du point P et les coordonnées de son image p .

Supposons d'abord que le point P est situé dans le plan $yc-zc$ de la caméra cadre. Ses coordonnées sont

$$P = \begin{pmatrix} 0 \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

Le point projeté p est dans ce cas situé dans l'axe y_i du plan image

$$p = \begin{pmatrix} 0 \\ y_i \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Du fait de la similarité des triangles P P1Oc et poOc on peut écrire

$$\frac{y_c}{\text{toi}} = \frac{z_c}{F_c}$$

ou

$$y_i = f_c z_c \frac{y_c}{z_c} . \quad (8.3)$$

Considérons également le point Q situé dans le plan xc–zc du cadre de la caméra. Après la projection en perspective du point Q, son image q tombe sur l'axe xi du cadre d'image. A cause des triangles semblables Q Q1Oc et qoOc on a

$$\frac{x_c}{x_{ii}} = \frac{z_c}{F_c}$$

ou

$$x_i = f_c z_c \frac{x_c}{z_c} . \quad (8.4)$$

De cette manière, nous avons obtenu la relation entre les coordonnées (xc, yc, zc) du point P dans le repère de la caméra et les coordonnées (xi, yi) du point p dans le plan image. Les équations (8.3) et (8.4) représentent la description mathématique de la projection perspective d'un espace 3D sur un espace 2D. Les deux équations peuvent être écrites sous la forme d'une équation matricielle perspective

$$\begin{matrix} & x_{ii} & & & x_c \\ & & & & y_c \\ s & \text{oui} & = & \begin{matrix} F_c & 0 & 0 \\ 0 & f_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} & \cdot & \begin{matrix} z_c \\ \\ 1 \end{matrix} \\ & 1 & & & \end{matrix} \quad (8.5)$$

Dans l'éq. (8.5) s est un facteur d'échelle, tandis que (xi, yi) sont les coordonnées du point projeté dans le cadre de l'image et (xc, yc, zc) sont les coordonnées du point d'origine dans le cadre de la caméra.

De la matrice Eq. (8.5) il n'est pas difficile de réaliser que l'on peut déterminer de manière unique les coordonnées (xi, yi) et le facteur d'échelle s en connaissant (xc, yc, zc). Au contraire, nous ne pouvons pas calculer les coordonnées (xc, yc, zc) dans le cadre de la caméra lorsque seules les coordonnées (xi, yi) dans le cadre de l'image sont connues, mais pas le facteur d'échelle. L'équation (8.5) représente la projection vers l'avant en vision robotique. Le calcul de (xc, yc, zc) à partir de (xi, yi) est appelé rétroprojection. Lors de l'utilisation d'une seule caméra et sans information a priori sur la taille des objets dans l'environnement du robot, une solution unique du problème inverse ne peut pas être trouvée.

Pour faciliter la programmation, il est plus pratique d'utiliser des indices, marquant la position d'un pixel (c'est-à-dire le plus petit élément d'une image numérique) dans une image 2D au lieu d'unités métriques le long des axes xi et yi du cadre de l'image. Nous utiliserons deux indices que nous appellerons coordonnées d'indice d'un pixel (Fig. 8.3). Ce sont l'index de ligne et l'index de colonne. Dans la mémoire stockant l'image numérique, l'index de ligne va du

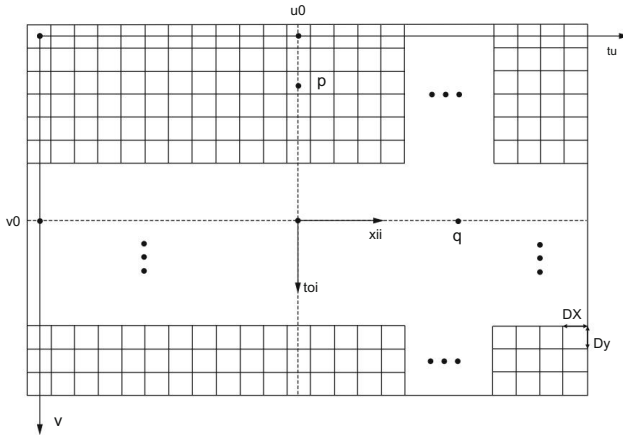


Fig. 8.3 Le plan image et le cadre de coordonnées d'index

haut de l'image vers le bas tandis que l'index de colonne commence à gauche et s'arrête au bord droit de l'image. Nous utiliserons l'axe u pour les indices de colonne et l'axe v pour les indices de ligne. De cette manière, le cadre de coordonnées d'index $u - v$ appartient à chaque image particulière. Le pixel supérieur gauche est noté soit $(0, 0)$, soit $(1, 1)$. Les coordonnées d'index n'ont pas d'unités de mesure.

Dans la suite du texte, nous trouverons la relation entre les coordonnées de l'image (x_i, y_i) et les coordonnées de l'indice (u, v). Supposons que l'image numérique a été obtenue en sortie directe du capteur d'image (la conversion A/N a été effectuée en sortie du capteur d'image). Dans ce cas chaque pixel correspond à un élément particulier du capteur d'image. Nous supposons que la surface du capteur d'image est rectangulaire.

L'origine du repère image est au point (u_0, v_0) du repère index. La taille d'un pixel est représentée par le couple (D_x, D_y) . La relation entre le cadre d'image $x_i - y_i$ et le cadre d'index $u - v$ est décrite par les deux équations suivantes

$$\begin{aligned} \frac{x_{ii}}{D_x} &= u - u_0 \\ \frac{y_i}{D_y} &= v - v_0. \end{aligned} \quad (8.6)$$

Les équations (8.6) peuvent être réécrites sous la forme

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \frac{x_{ii}}{D_x} \\ v &= v_0 + \frac{y_i}{D_y}. \end{aligned} \quad (8.7)$$

dans l'éq. (8.7), ^{xii} et ^{xvi} représentent le nombre de conversions numériques le long de la ligne et de la colonne respectivement. L'équation (8.7) peut être réécrite sous la forme matricielle suivante

$$\begin{pmatrix} tu \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{D_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{v_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

En utilisant le modèle de caméra à sténopé, nous pouvons maintenant combiner Eq. (8.5), reliant les coordonnées de l'image aux coordonnées de la caméra, et Eq. (8.8), décrivant la relation entre l'image et les coordonnées d'index

$$\begin{pmatrix} tu \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{D_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{v_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f c & 0 & 0 \\ 0 & f c & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f c}{D_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f c}{v_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8.9)$$

La matrice ci-dessus peut également être écrite sous la forme suivante

$$P = \begin{pmatrix} f c & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.10)$$

La matrice P représente la projection en perspective du cadre de la caméra dans le cadre de coordonnées d'index correspondant. Les variables

$$f_x = \frac{f c}{D_x} \quad (8.11)$$

$$f_y = \frac{f c}{D_y}$$

sont les focales de la caméra selon les axes x_c et y_c . Les paramètres f_x , f_{u0} et y , v_0 sont appelés les paramètres intrinsèques d'une caméra.

En général les paramètres intrinsèques de la caméra ne sont pas connus. Les spécifications de l'appareil photo et des objectifs ne sont pas suffisamment précises. Les paramètres intrinsèques de la caméra sont donc obtenus par le processus d'étalonnage de la caméra. En connaissant les paramètres intrinsèques de la caméra, nous pouvons calculer de manière unique les coordonnées d'index (u , v) à partir des coordonnées données (x_c , y_c , z_c). Les coordonnées (x_c , y_c , z_c) ne peuvent pas être déterminées à partir des coordonnées connues (u , v) sans connaître le facteur d'échelle.

8.3 Rétroprojection

L'image numérique est représentée par une matrice de pixels. Comme les coordonnées d'index (u, v) n'ont pas d'unités de mesure, cela signifie que les caractéristiques de l'image sont décrites plus qualitativement que quantitativement. Si nous souhaitons exprimer les distances en unités métriques, nous devons connaître la relation entre les coordonnées d'index (u, v) et les coordonnées (x_r, y_r, z_r) dans le référentiel 3D. Sans connaître les dimensions réelles ou la géométrie de la scène, il est impossible de reconnaître les caractéristiques de l'image.

8.3.1 Caméra unique

Supposons que nous ayons un système de vision robotique avec une seule caméra. Le système a l'image de l'espace de travail du robot comme entrée et doit reproduire des mesures géométriques comme sortie. Les transformations nécessaires entre les cadres de coordonnées sont évidentes sur la Fig. 8.4.

Supposons que nous soyons maintenant en mesure de reconnaître le point q dans l'image. Notre but est de déterminer les coordonnées du point réel Q à partir des coordonnées de son image q . C'est le problème de la rétroprojection. Afin de résoudre le problème, nous devons savoir comment les coordonnées du point q sont liées aux coordonnées du point réel Q dans le référentiel, ce qui est le problème de la projection vers l'avant.

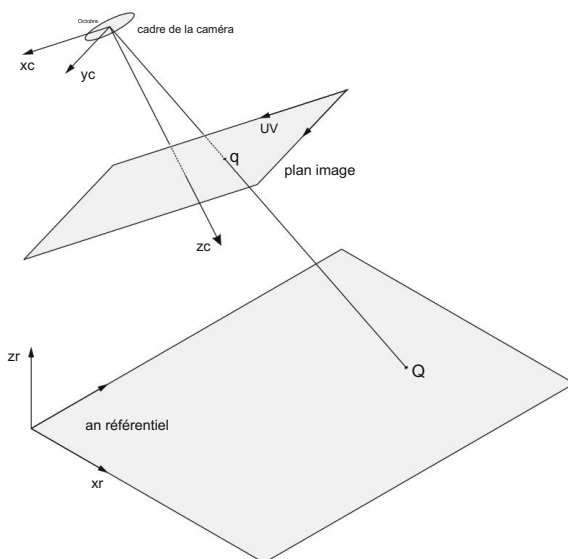


Fig. 8.4 Les cadres de coordonnées dans un système de vision robotique

Réolvons d'abord le problème de la projection vers l'avant. Le point Q est donné par les coordonnées (x_r, y_r, z_r) dans le repère de coordonnées de référence. On souhaite déterminer les coordonnées de son image $q = (u, v)$, exprimées dans le référentiel. Le cadre x_c - y_c - z_c est fixé à la caméra. La matrice M représente la transformation de la référence dans le cadre de la caméra

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{pmatrix} . \quad (8.12)$$

En combinant les éqs. (8.12) et (8.9), on obtient

$$\begin{pmatrix} s \\ u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = PM \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{pmatrix} . \quad (8.13)$$

La relation (8.13) décrit la projection vers l'avant. Les éléments de la matrice P sont les paramètres intrinsèques de la caméra, tandis que les éléments de la matrice M représentent ses paramètres extrinsèques. La matrice 3×4

$$H = PM \quad (8.14)$$

s'appelle la matrice de calibrage de la caméra. Il est utilisé dans le processus d'étalonnage afin de déterminer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

Dans la suite du texte, nous considérerons la rétroprojection. Notre objectif est de déterminer les coordonnées (x_r, y_r, z_r) du point réel Q à partir des coordonnées connues du point image (u, v) et de la matrice de calibration H. Le facteur d'échelle s n'est pas connu. Dans (8.13) nous avons quatre inconnues s, x_r , y_r et z_r et seulement trois équations pour un seul point de l'espace.

Essayons avec trois points A, B et C (Fig. 8.5). Nous connaissons les distances entre ces trois points. Leurs coordonnées dans le référentiel sont

$$(x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}), j = 1, 2, 3 .$$

Les coordonnées des points d'image correspondants sont

$$(u_j, v_j), j = 1, 2, 3 .$$

La projection vers l'avant peut être écrite sous la forme suivante

$$\begin{pmatrix} s \\ u_j \\ v_j \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} x_{rj} \\ y_{rj} \\ z_{rj} \\ 1 \end{pmatrix} . \quad (8.15)$$

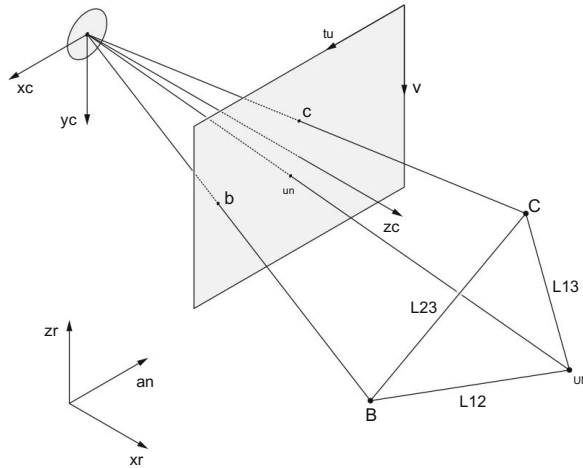


Fig. 8.5 Exemple de projection de trois points

Dans l'éq. (8.15) nous avons 12 inconnues et 9 équations. Pour résoudre le problème, nous avons besoin de trois équations supplémentaires. Ces équations peuvent être obtenues à partir de la taille du triangle représenté par les points A, B et C. Nous noterons les côtés du triangle AB, BC et CA comme les longueurs L_{12} , L_{23} et L_{31}

$$\begin{aligned} L_{12}^2 &= (x_{r1} - x_{r2})^2 + (y_{r1} - y_{r2})^2 + (z_{r1} - z_{r2})^2 \\ L_{23}^2 &= (x_{r2} - x_{r3})^2 + (y_{r2} - y_{r3})^2 + (z_{r2} - z_{r3})^2 \\ L_{31}^2 &= (x_{r3} - x_{r1})^2 + (y_{r3} - y_{r1})^2 + (z_{r3} - z_{r1})^2. \end{aligned} \quad (8.16)$$

Nous avons maintenant douze équations pour les douze inconnues. Ainsi, la solution du problème inverse existe. Il est gênant que les trois dernières équations soient non linéaires, nécessitant un ordinateur pour la résolution numérique des équations. L'approche est appelée rétroprojection basée sur un modèle.

8.3.2 Vision stéréo

Étant donné que le modèle de l'objet observé n'est généralement pas disponible ou que l'objet change avec le temps, d'autres solutions au problème de rétroprojection doivent être trouvées.

Une solution possible est l'utilisation de la vision stéréo : détection basée sur deux caméras. Le principe est similaire à la perception visuelle humaine où les images vues par les yeux gauche et droit diffèrent légèrement en raison de la parallaxe et le cerveau utilise les différences entre les images pour déterminer la distance à l'objet observé.

Pour plus de simplicité, nous supposons deux caméras parallèles qui observent le point Q, comme illustré à la Fig. 8.6. Le point Q est projeté sur le plan image des caméras gauche et droite.

Le plan image de la caméra gauche contient la projection q_l avec les coordonnées $x_{l,l}$ et $y_{l,l}$.

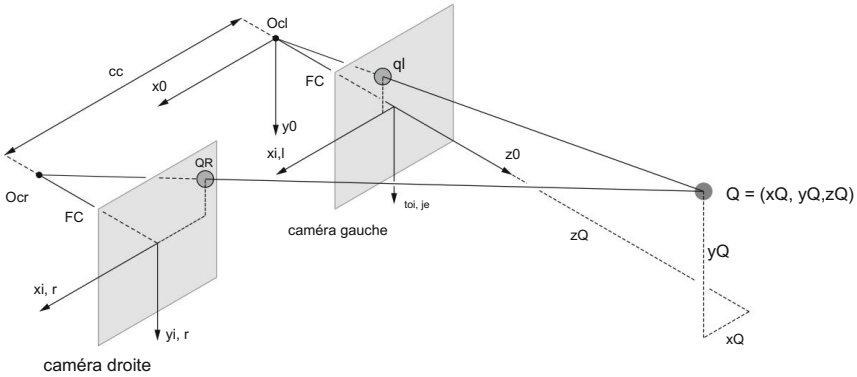


Fig. 8.6 Vue stéréo du point Q avec deux caméras parallèles

tandis que le plan image de la caméra de droite contient la projection qr avec les coordonnées xi,r et yi,r . Les axes du cadre de coordonnées du système de vision $x_0-y_0-z_0$ ont les mêmes directions que le cadre de coordonnées de la caméra gauche.

La figure 8.7a montre la vue de dessus, tandis que la figure 8.7b montre la vue latérale de la situation de la figure 8.6. Ces vues nous aideront à calculer les coordonnées du point Q. De la géométrie de la Fig. 8.7a, nous pouvons extraire les relations suivantes (les distances xQ , yQ et zQ sont par rapport au cadre de coordonnées $x_0-y_0-z_0$)

$$\begin{aligned} \frac{zQ}{fc} &= \frac{xQ}{xi,l} \\ \frac{zQ}{fc} &= \frac{xQ - dc}{xi,r} \end{aligned} \quad (8.17)$$

où dc est la distance entre les caméras. À partir de la première équation de (8.17), nous exprimons

$$xQ = zQ \frac{xi,l}{fc} \quad (8.18)$$

et insérez dans la deuxième équation pour obtenir

$$\frac{xi,l zQ}{xi,r fc} - \frac{zQ}{fc} = \frac{cc}{xi,r} \quad (8.19)$$

Nous pouvons alors déterminer la distance zQ au point Q comme

$$zQ = \frac{fcdc}{xi,l - xi,r} \quad (8.20)$$

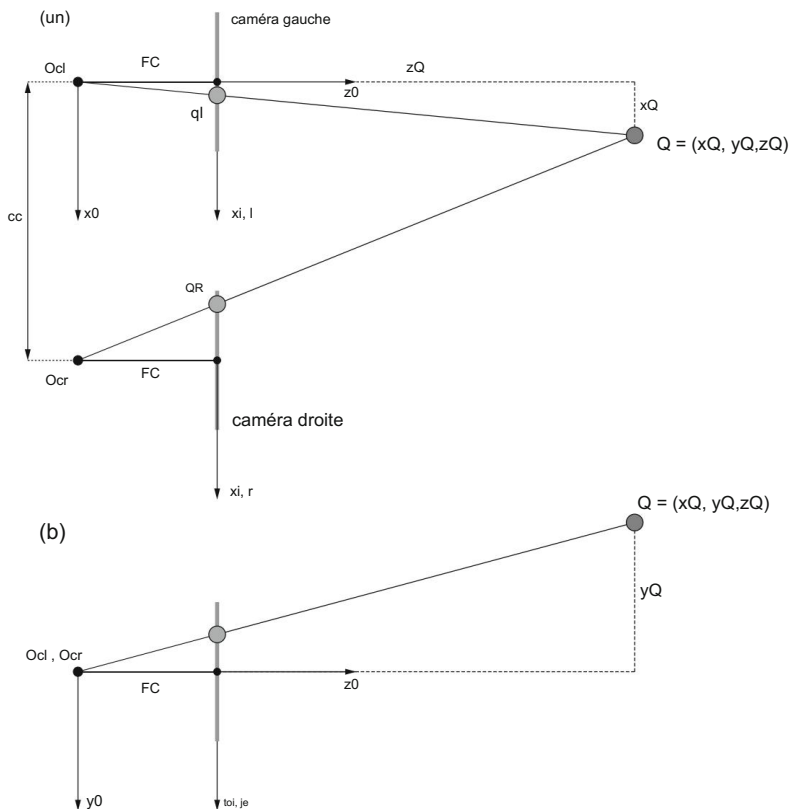


Fig. 8.7 Projections du point Q sur les plans des caméras gauche et droite. La figure supérieure a montré une vue des deux caméras de dessus, tandis que la figure inférieure b montre une vue latérale des caméras

La distance xQ peut être déterminée à partir de l'Eq. (8.18). Pour déterminer la distance yQ , nous nous référons à la Fig. 8.7b. De la géométrie, nous pouvons extraire la relation

$$\frac{zQ}{fc} = \frac{yQ}{toi, je}, \quad (8.21)$$

nous permettant de calculer la coordonnée restante

$$yQ = zQ \cdot \frac{y_{i,l}}{FC} \quad (8.22)$$

L'utilisation de deux caméras permet de calculer la position (et l'orientation) d'un objet dans l'espace sans modèle précis de l'objet.

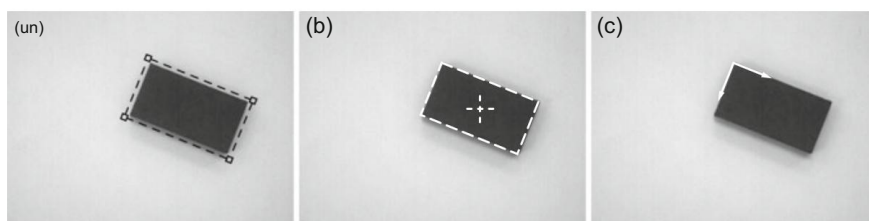


Fig. 8.8 a Définition du modèle, b caractéristiques de l'objet reconnu, c objet localisé

8.4 Traitement des images

Contrairement à la plupart des autres systèmes sensoriels, les systèmes visuels fournissent des informations très accessibles, qui nécessitent des algorithmes de traitement complexes avant de pouvoir être utilisées pour le contrôle du robot. L'objectif du traitement d'image est d'obtenir des informations numériques à partir de l'image, qui fournissent une description robuste de l'objet dans la scène. Un exemple du résultat du traitement d'image est illustré à la Fig. 8.8. Un objet est d'abord identifié dans la scène, puis sa pose est déterminée comme marquée avec le cadre de coordonnées.

Le traitement d'image est au-delà de la portée de ce livre et il ne sera pas spécifiquement abordé ici.

8.5 Pose de l'objet à partir de l'image

Afin de contrôler le robot par rapport à l'objet d'intérêt, la pose de l'objet doit être définie par rapport au cadre de coordonnées du robot $x-y-z$. Comme le montre la Fig. 8.8, la pose de l'objet est connue dans le cadre de coordonnées de l'image après le traitement de l'image.

Afin de déterminer sa pose dans le cadre du robot, la transformation entre l'image et le cadre de coordonnées du robot doit être définie, qui est le résultat de l'étalonnage de la caméra. La figure 8.9 présente une approche simple pour le problème de calibration, où le plan image est parallèle au plan horizontal. Pour plus de simplicité, le cadre d'image $x_i-y_i-z_i$ est situé au même point que le cadre d'index $u-v$ (l'axe z_i a été ajouté au cadre d'image pour accentuer la rotation autour de l'axe vertical).

8.5.1 Étalonnage de la caméra

La caméra est montée dans une position fixe au-dessus de l'espace de travail du robot. Le calibrage est effectué avec le motif de calibrage (damier) et la pointe de calibrage au niveau de l'effecteur final du robot. Le motif d'étalonnage peut être augmenté d'un marqueur de repère, qui apparaît dans l'image pour être utilisé comme point de référence ou mesure. Le but de la procédure de calibration est de trouver la matrice de transformation H_i entre l'image


$$H_{cp} = \text{Salut } iH_{cp}, \quad (8.23)$$

où Hcp et iHcp sont les poses du motif d'étalonnage exprimées respectivement dans le robot et le cadre de coordonnées de l'image.

La pose du motif d'étalonnage iHcp exprimée dans le cadre de coordonnées d'image xi-yi-zi est le résultat du traitement d'image

$$iH_{cp} = \begin{pmatrix} \cos i_{cp} & -\sin i_{cp} & 0 & j_{cp} \\ \sin i_{cp} & \cos i_{cp} & 0 & x_{cp} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8.24)$$

où i_{cp} et j_{cp} (par ii xcp, ycp) sont l'orientation et la position du motif de calibrage rapport au plan image, respectivement. La position est exprimée en unités métriques comme

$$\begin{pmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u_{cp} \\ v_{cp} \end{pmatrix}, \quad (8.25)$$

où (u_{cp} , v_{cp}) sont les coordonnées d'origine du motif d'étalonnage en pixels et λ est le rapport entre la position exprimée en unités métriques et les pixels sur l'image (le rapport peut être obtenu à partir du motif d'étalonnage avec la taille connue des champs noirs et blancs). La matrice iHcp représente une rotation autour de l'axe zi et une translation le long des axes xi et yi du cadre de coordonnées de l'image.

La pose du modèle d'étalonnage Hcp exprimée dans le cadre de coordonnées du robot x-y-z peut être déterminée avec la pointe d'étalonnage au niveau de l'effecteur final du robot et les points d'étalonnage marqués sur le modèle d'étalonnage. En plaçant la pointe d'étalonnage sur le point d'étalonnage, en enregistrant les coordonnées de l'effecteur terminal du robot et en répétant la procédure pour les trois points d'étalonnage, un ensemble de coordonnées est obtenu qui permet de définir la pose du modèle d'étalonnage par rapport au cadre de coordonnées du robot comme

$$H_{cp} = \begin{pmatrix} \cos i_{cp} & -\sin i_{cp} & 0 & x_{cp} \\ \sin i_{cp} & \cos i_{cp} & 0 & y_{cp} \\ 0 & 0 & 1 & z_{cp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8.26)$$

où i_{cp} et (x_{cp} , y_{cp} , z_{cp}) sont respectivement l'orientation et la position du motif d'étalonnage par rapport au châssis du robot.

À partir des éqs. (8.23), (8.24) et (8.26) la matrice de transformation entre l'image et les cadres de coordonnées du robot peuvent être obtenus comme

$$H_i = H_{cp} iH_{cp}^{-1} \quad (8.27)$$

8.5.2 Pose d'objet

Avec le H_i connu, la pose de l'objet H_o par rapport au cadre de coordonnées du robot peut être déterminée comme indiqué sur la Fig. 8.10.

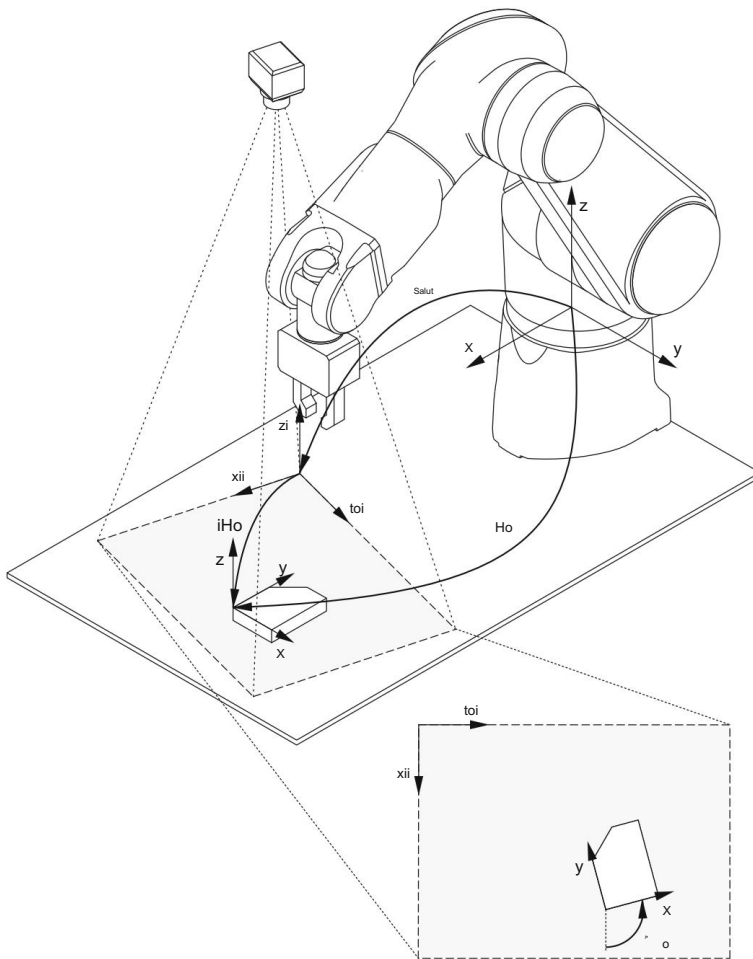


Fig. 8.10 Transformations utilisées pour le calcul de pose d'objet

La pose de l'objet iHo exprimée dans le cadre de coordonnées d'image $xi-yi-zi$ est le résultat du traitement d'image

$$iHo = \begin{pmatrix} \cos i & 0 & -\sin i & 0 \\ 0 & \sin i & 0 & \cos i \\ \sin 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8.28)$$

où θ et (x_o, y_o) sont l'orientation et la position de l'objet par rapport au image, respectivement. La position est exprimée en unités métriques comme

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u_o \\ v_o \end{pmatrix}, \quad (8.29)$$

où (u_o, v_o) sont les coordonnées d'origine de l'objet en pixels.

Enfin, H_o peut être déterminé comme

$$H_o = S^{-1} H_i. \quad (8.30)$$

Chapitre 9

Planification de trajectoire



Dans les chapitres précédents, nous avons étudié des modèles mathématiques de mécanismes de robots. Nous nous sommes d'abord intéressés à la cinématique et à la dynamique des robots. Avant d'appliquer ces connaissances au contrôle du robot, nous devons nous familiariser avec la planification du mouvement du robot. L'objectif de la planification de trajectoire est de générer les entrées de référence pour le système de contrôle du robot, ce qui garantira que l'effecteur final du robot suivra la trajectoire souhaitée.

Le mouvement du robot est généralement défini dans le cadre de coordonnées mondial rectangulaire placé dans l'espace de travail du robot le plus pratique pour la tâche du robot. Dans la tâche la plus simple, nous définissons uniquement le point initial et le point final de l'effecteur final du robot. Le modèle cinématique inverse est ensuite utilisé pour calculer les variables articulaires correspondant à la position souhaitée de l'effecteur du robot.

9.1 Interpolation de la trajectoire entre deux points

Lors d'un déplacement entre deux points, le robot manipulateur doit être déplacé du point initial au point final dans un intervalle de temps donné t_f . Souvent, nous ne sommes pas intéressés par la trajectoire précise entre les deux points. Néanmoins, nous devons déterminer l'évolution temporelle du mouvement pour chaque variable articulaire et fournir la trajectoire calculée à l'entrée de commande.

La variable articulaire est soit l'angle θ pour l'articulation de rotation, soit le déplacement d pour l'articulation de translation. Lors de l'examen de l'interpolation de la trajectoire, nous ne distinguerons pas les articulations de rotation et de translation, de sorte que la variable articulaire sera plus généralement notée q . Avec les manipulateurs industriels se déplaçant entre deux points, nous sélectionnons le plus souvent le profil de vitesse dit trapézoïdal.

Le mouvement du robot commence à $t = 0$ avec une accélération constante, suivi de la phase de vitesse constante et terminé par la phase de décélération constante (Fig. 9.1).

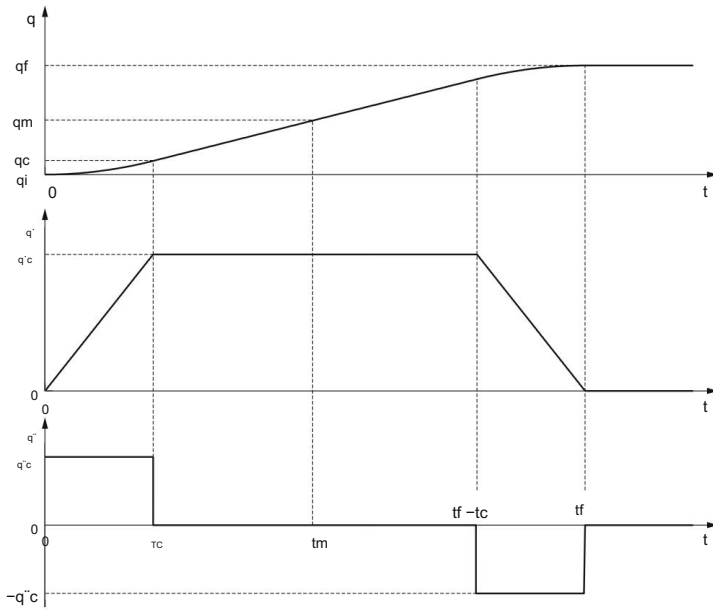


Fig. 9.1 La dépendance temporelle des variables articulaires avec un profil de vitesse trapézoïdal

La trajectoire résultante de l'angle de l'articulation ou du déplacement consiste en l'intervalle linéaire central, qui commence et se termine par un segment parabolique. Les vitesses initiale et finale du mouvement entre les deux points sont nulles. La durée de la phase d'accélération constante est égale à l'intervalle avec la décélération constante. Dans les deux phases, l'amplitude de l'accélération est $q''c$. De cette manière, nous traitons une trajectoire symétrique, où

$$q_m = \frac{q_f + q_i}{2} \quad \text{à l'instant } t_m = \frac{t}{2}. \quad (9.1)$$

La trajectoire $q(t)$ doit satisfaire plusieurs contraintes pour que l'articulation du robot se déplace du point initial q_i au point final q_f dans l'intervalle de temps requis. La vitesse à la fin de la phase parabolique initiale doit être égale à la constante t_f vitesse dans la phase linéaire. La vitesse dans la première phase est obtenue à partir de l'équation décrivant le mouvement d'accélération constante

$$q' = \ddot{q}ct. \quad (9.2)$$

A la fin de la première phase, nous avons

$$q'_c = \ddot{q}ct_c. \quad (9.3)$$

La vitesse dans la deuxième phase peut être déterminée à l'aide de la Fig. 9.1

$$\dot{q}'c = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c}, \quad (9.4)$$

où q_c représente la valeur de la variable conjointe q à la fin de la phase parabolique initiale (c'est-à-dire au temps t_c). Jusqu'à ce moment, le mouvement avec une accélération constante $\ddot{q}'c$ a lieu, donc la vitesse est déterminée par Eq. (9.2). La dépendance temporelle de la position de l'articulation est obtenue en intégrant l'Eq. (9.2)

$$qdt^2 = \ddot{q}'c t dt = \ddot{q}'c q = \frac{1}{2} \ddot{q}'c t^2 + q_i, \quad (9.5)$$

où la position initiale de l'articulation q_i est prise comme constante d'intégration. A la fin de la première phase, nous avons

$$q_c = q_i + \frac{1}{2} \ddot{q}'c t_c^2. \quad (9.6)$$

La vitesse à la fin de la première phase (9.3) est égale à la vitesse constante dans la deuxième phase (9.4)

$$\dot{q}'c t_c = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c}. \quad (9.7)$$

En insérant l'Eq. (9.6) dans l'éq. (9.7) et en considérant l'expression (9.1), on obtient, après réarrangement, l'équation quadratique suivante

$$\ddot{q}'c t_c^2 - \ddot{q}'c t_f t_c + q_f - q_i = 0. \quad (9.8)$$

L'accélération $\ddot{q}'c$ est déterminée par l'actionneur sélectionné et les propriétés dynamiques du mécanisme du robot. Pour q_i , q_f , $\ddot{q}'c$ et t_f choisis, l'intervalle de temps t_c est

$$t_c = \frac{t_f}{2} - \frac{1}{2} \frac{2 t_f \ddot{q}'c - 4(q_f - q_i)}{\ddot{q}'c}. \quad (9.9)$$

Pour générer le mouvement entre le q_i initial et la position finale q_f le polynôme suivant doit être généré dans la première phase

$$1 q(t) = q_i + \ddot{q}'c t^2 \quad 0 \leq t \leq t_c. \quad (9.10)$$

Dans la deuxième phase, une trajectoire linéaire doit être générée à partir du point (t_c, q_c) , avec la pente $\dot{q}'c$

$$(q - q_c) = \dot{q}'c(t - t_c). \quad (9.11)$$

Après réarrangement on obtient

$$q(t) = q_i + \ddot{q} c(t - t_c)^2 \quad t_c < t \leq (t_f - t_c). \quad (9.12)$$

Dans la dernière phase, la trajectoire parabolique doit être générée de manière similaire à la première phase, sauf que maintenant le point extrême est dans (t_f, q_f) et la courbe est inversée

$$q(t) = q_f - \ddot{q} c(t - t_f)^2 \quad (t_f - t_c) < t \leq t_f. \quad (9.13)$$

De cette manière, nous avons obtenu analytiquement la dépendance temporelle de l'angle ou du déplacement de l'articulation de rotation ou de translation se déplaçant d'un point à un autre.

9.2 Interpolation par l'utilisation de points via

Dans certaines tâches de robot, des mouvements de l'effecteur plus complexes que les mouvements point à point sont nécessaires. En soudage, par exemple, les surfaces courbes des objets doivent être suivies. De telles trajectoires peuvent être obtenues en définissant, en plus du point initial et du point final, également ce que l'on appelle des points via lesquels l'effecteur final du robot doit se déplacer.

Dans ce chapitre nous allons analyser le problème, où l'on souhaite interpoler la trajectoire passant par n via les points $\{q_1, \dots, q_n\}$, qui doivent être atteints par le robot dans des intervalles de temps $\{t_1, \dots, t_n\}$. L'interpolation sera effectuée à l'aide de profils de vitesse trapézoïdaux. La trajectoire consistera en une séquence de segments linéaires décrivant les mouvements entre deux points via et des segments paraboliques représentant les transitions à travers les points via. Pour éviter la discontinuité de la dérivée première à l'instant t_k , la trajectoire $q(t)$ doit avoir une course parabolique au voisinage de q_k . Ce faisant, la dérivée seconde au point q_k (accélération) reste discontinue.

La trajectoire interpolée, définie comme une séquence de fonctions linéaires avec des transitions paraboliques passant par les via (le temps de transition t_k), est décrite analytiquement par les contraintes suivantes

$$q(t) = \begin{cases} a_{1,k}(t - t_k) + a_{0,k} & t_k + \frac{t_k}{2} \leq t < t_{k+1} - \frac{t_{k+1}}{2} \\ b_{2,k}(t - t_k)^2 + b_{1,k}(t - t_k) + b_{0,k} & \frac{t_k}{2} \leq t < t_k + \frac{t_k}{2} \end{cases} \quad (9.14)$$

Les coefficients $a_{0,k}$ et $a_{1,k}$ déterminent les parties linéaires de la trajectoire, où k représente l'indice du segment linéaire correspondant. Les coefficients $b_{0,k}$, $b_{1,k}$ et $b_{2,k}$ appartiennent aux transitions paraboliques. L'indice k représente le numéro consécutif d'un segment parabolique.

Tout d'abord, les vitesses dans les segments linéaires seront calculées à partir des positions données et des intervalles de temps correspondants, comme le montre la Fig. 9.2. Nous supposons que les vitesses initiale et finale sont égales à zéro. Dans ce cas nous avons

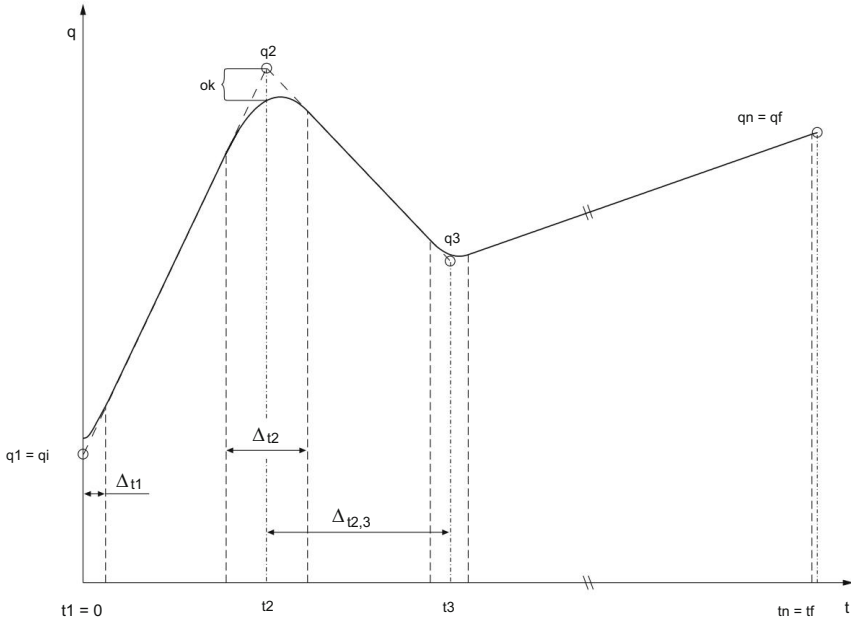


Fig. 9.2 Interpolation de trajectoire passant par n via des points - segments linéaires avec transitions paraboliques sont utilisés

$$q^{(k-1)} = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ \frac{q_k - q_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} & k = 2, \dots, n \\ 0 & k = n + 1. \end{cases} \quad (9.15)$$

De plus, nous devons déterminer les coefficients des segments linéaires $a_{0,k}$ et $a_{1,k}$. Le coefficient $a_{0,k}$ peut être trouvé à partir de la fonction linéaire (9.14), en tenant compte la position connue à l'instant t_k , lorsque le segment de robot s'approche du point q_k

$$q(t_k) = q_k = a_{1,k} (t_k - t_k) + a_{0,k} = a_{0,k}, \quad (9.16)$$

donc

$$t = t_k \quad a_{0,k} = q_k \quad k = 1, \dots, n - 1. \quad (9.17)$$

Le coefficient $a_{1,k}$ peut être déterminé à partir de la dérivée temporelle de la fonction linéaire (9.14)

$$\dot{q}(t) = a_{1,k}. \quad (9.18)$$

En considérant les vitesses données dans l'intervalle de temps $t_{k,k+1}$, on obtient

$$a_{1,k} = \dot{q}_{k,k+1} \quad k = 1, \dots, n - 1. \quad (9.19)$$

De cette manière, les coefficients des segments linéaires de la trajectoire sont déterminés et nous pouvons procéder aux coefficients des fonctions paraboliques. Nous supposons que le temps de transition est prédéterminé comme t_k .

Si le temps de transition n'est pas prescrit, la valeur absolue de l'accélération $|\ddot{q}_k|$ dans le point intermédiaire doit d'abord être défini, puis le temps de transition est calculé à partir des accélérations et des vitesses avant et après le point intermédiaire. Dans ce cas, seul le signe de l'accélération doit être déterminé en considérant le signe de la différence de vitesse au point de passage

$$\ddot{q}_k = \text{signe}(\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}) |\ddot{q}_k|, \quad (9.20)$$

où $\text{signe}(\cdot)$ désigne le signe de l'expression entre parenthèses. Compte tenu des valeurs des accélérations aux points de passage et des vitesses avant et après le point de passage, le temps de déplacement à travers le point de passage t_k est calculé (décélération et accélération)

$$t_k = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{\ddot{q}_k}. \quad (9.21)$$

Nous allons procéder en calculant les coefficients des fonctions quadratiques. La continuité requise de la vitesse pendant la transition du segment de trajectoire linéaire au segment de trajectoire parabolique à l'instant $(t_k -)$ et la vitesse requise $\dot{q}_{k,k+1}$ en

La continuité lors du passage du segment parabolique au segment linéaire en $(t_k +)$ représente le point de départ du calcul des coefficients $b_{1,k}$ et $b_{2,k}$. Tout d'abord, nous calculons la dérivée temporelle de la fonction quadratique (9.14)

$$\dot{q}(t) = 2b_{2,k}(t - t_k) + b_{1,k}. \quad (9.22)$$

En supposant que la vitesse à l'instant $(t_k -)$ soit $\dot{q}_{k-1,k}$, tandis qu'en $(t_k +)$, il $\dot{q}_{k,k+1}$, on peut écrire

$$\begin{aligned} \dot{q}_{k-1,k} &= 2b_{2,k} t_k - t_k + b_{1,k} = -b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t &= t_k - \frac{t_k}{2} \\ \dot{q}_{k,k+1} &= 2b_{2,k} t_k + t_k + b_{1,k} = b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t &= t_k + \frac{t_k}{2}. \end{aligned} \quad (9.23)$$

En ajoutant l'éq. (9.23), le coefficient $b_{1,k}$ peut être déterminé

$$b_{1,k} = 2 \frac{\dot{q}_{k,k+1} + \dot{q}_{k-1,k}}{2} \quad k = 1, \dots, n \quad (9.24)$$

et en soustrayant l'Eq. (9.23), le coefficient $b_{2,k}$ est calculé

$$b_{2,k} = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{2t_k} = \frac{\ddot{q}_k}{2} \quad k = 1, \dots, n. \quad (9.25)$$

En tenant compte de la continuité de la position à l'instant $(t_k + \frac{t_k}{2})$, le polynôme quadratique on peut calculer. A $(t_k + \frac{t_k}{2})$, la position $q(t)$, calculée à partir de la fonction linéaire

$$q(t_k + \frac{t_k}{2}) = a_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} - t_k + a_{0,k} = q_{k,k+1} \frac{t_k}{2} + q_k \frac{t_k}{2} \quad (9.26)$$

est égal à la position $q(t)$, calculée à partir de la fonction quadratique

$$\begin{aligned} q(t_k + \frac{t_k}{2}) &= b_{2,k} t_k^2 + \frac{t_k}{2} - t_k + b_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} - t_k + b_{0,k} \\ &= \frac{q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k}}{2t_k} \frac{t_k^2}{2} + \frac{q'_{k,k+1} + q'_{k-1,k}}{2} \cdot \frac{t_k}{2} + b_{0,k} \end{aligned} \quad (9.27)$$

En égalant (9.26) et (9.27) le coefficient $b_{0,k}$ est déterminé

$$b_{0,k} = q_k + (q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k}) \frac{t_k}{8} \quad (9.28)$$

On peut vérifier que le coefficient calculé $b_{0,k}$ assure aussi la continuité de position à l'instant $(t_k - \frac{t_k}{2})$. Un tel choix du coefficient $b_{0,k}$ empêche la trajectoire conjointe de passer par le point q_k . Le robot ne fait que s'approcher plus ou moins de ce point. La distance de la trajectoire calculée à partir du point de référence dépend principalement de l'intervalle de temps de décélération et d'accélération t_k , qui est prédéterminé par l'accélération requise $|q''_k|$. L'erreur e_k de la trajectoire calculée peut être estimée en comparant la position souhaitée q_k à la position réelle $q(t)$ à l'instant t_k , qui est obtenue en insérant t_k dans la fonction quadratique (9.14)

$$e_k = q_k - q(t_k) = q_k - b_{0,k} = -(q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k}) \frac{t_k}{8} \quad (9.29)$$

On peut remarquer que l'erreur e_k est nulle uniquement lorsque les vitesses des segments linéaires avant et après les points de passage sont égales ou lorsque l'intervalle de temps t_k est nul, ce qui signifie une accélération infinie (ce qui en réalité n'est pas possible).

L'approche décrite pour l'interpolation de trajectoire présente une lacune mineure. De l'éq. (9.29) on peut observer qu'au lieu d'atteindre le point de passage, le robot le contourne. Comme les points de trajectoire initiale et finale sont également considérés comme des points de passage, une erreur est introduite dans la planification de la trajectoire. Au point de départ de la trajectoire, la position réelle et la position souhaitée diffèrent de l'erreur e_1 (Fig. 9.3, la courbe de lumière montre la trajectoire sans correction), résultant de l'Eq. (9.29). L'erreur représente une étape dans le signal de position, ce qui n'est pas souhaité en robotique. Pour éviter ce brusque changement de position, le premier et le dernier point de trajectoire doivent être traités séparément des points de passage.

Les vitesses requises aux points de départ et d'arrivée doivent être nulles. La vitesse à la fin de l'intervalle de temps t_1 doit être égale à la vitesse du premier

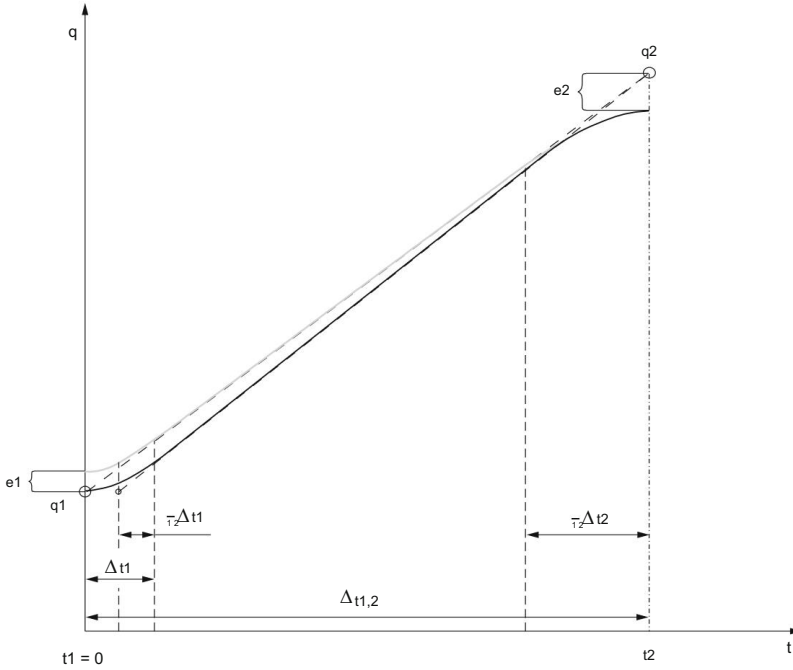


Fig. 9.3 Interpolation de trajectoire - présentation agrandie du premier segment de la trajectoire illustrée à la Fig. 9.2. La courbe plus claire représente la trajectoire sans correction, tandis que la courbe plus foncée montre la trajectoire corrigée

segment linéaire. Tout d'abord, nous calculons la vitesse dans la partie linéaire

$$\dot{q}_{1,2} = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2t_1}} \quad (9h30)$$

L'équation (9.30) est similaire à l'équation (9.15), seulement que maintenant $\frac{1}{2t_1}$ est soustrait au dénominateur, car dans le court intervalle de temps (le début du segment parabolique sur la Fig. 9.3), la position du robot ne change que dans une très faible mesure. Ce faisant, une vitesse plus élevée dans le segment linéaire de la trajectoire est obtenue. A la fin de l'intervalle d'accélération t_1 nous avons

$$\frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2t_1}} = \ddot{q}_1 t_1 \quad (9.31)$$

Il faut aussi déterminer l'accélération $\ddot{q}_1$ au point de départ de la trajectoire.

En supposant que sa valeur absolue $|\ddot{q}_1|$ était prédéterminé, seul le signe doit être choisi de manière adéquate. Le choix du signe sera effectué sur la base de la différence de position. En principe, la différence de vitesse doit être prise en compte

lors de la détermination du signe de l'accélération, la vitesse initiale est cependant nulle, et le signe peut donc dépendre de la différence de positions.

$$\ddot{q}^1 = \text{signe}(q_2 - q_1) |\ddot{q}^1|. \quad (9.32)$$

De l'éq. (9.31), l'intervalle de temps t_1 est calculé

$$\frac{1}{2} (\ddot{q}^1 (q_2 - q_1)) = \ddot{q}^1 t_1 (t_2 - t_1 - \frac{1}{2} t_1). \quad (9.33)$$

Après réarrangement on obtient

$$-\frac{1}{2} \ddot{q}^1 t_1^2 + \ddot{q}^1 (t_2 - t_1) t_1 - (q_2 - q_1) = 0, \quad (9.34)$$

donc l'intervalle de temps t_1 est

$$t_1 = \frac{-\ddot{q}^1 (t_2 - t_1) \pm \sqrt{\ddot{q}^1^2 (t_2 - t_1)^2 - 2\ddot{q}^1 (q_2 - q_1)}}{-\ddot{q}^1}, \quad (9h35)$$

et après avoir simplifié l'Eq. (9h35)

$$t_1 = (t_2 - t_1) - \frac{(t_2 - t_1)^2 - \frac{2(q_2 - q_1)}{\ddot{q}^1}}{2(t_2 - t_1)}. \quad (9.36)$$

Dans l'éq. (9.36), le signe moins a été choisi avant la racine carrée, car l'intervalle de temps t_1 doit être plus court que $(t_2 - t_1)$. De l'éq. (9.30), la vitesse dans la partie linéaire de la trajectoire peut être calculée. Comme le montre la Fig. 9.3 (la courbe la plus sombre représente la trajectoire corrigée), la correction introduite élimine l'erreur dans la position initiale.

De même, comme pour le premier segment, la correction doit être calculée également pour le dernier segment entre les points q_{n-1} et q_n . La vitesse dans le dernier segment linéaire est

$$\dot{q}^{n-1,n} = \frac{q_n - q_{n-1}}{t_n - t_{n-1} - \frac{1}{2} t_n}. \quad (9.37)$$

Au dénominateur de l'Eq. (9.37) la valeur $\frac{1}{2} t_n$ a été soustraite, car juste avant l'arrêt complet du robot, sa position ne change que très peu. A la transition du dernier segment linéaire au dernier segment parabolique les vitesses sont égales

$$\frac{q_n - q_{n-1}}{t_n - t_{n-1} - \frac{1}{2} t_n} = \ddot{q}^n t_n. \quad (9.38)$$

L'accélération (décélération) du dernier segment parabolique est déterminée sur la base de la différence de position

$$q''_n = \text{signe}(q_{n-1} - q_n) |q''_n|. \quad (9.39)$$

En insérant l'équation ci-dessus dans Eq. (9.38), on calcule, de la même manière que pour le premier segment parabolique, ainsi que la durée du dernier segment parabolique

$$t_n = (t_n - t_{n-1}) - \frac{(t_n - t_{n-1})^2}{2} \frac{2(q_n - q_{n-1})}{q''_n}. \quad (9h40)$$

De l'éq. (9.37), la vitesse du dernier segment linéaire peut être déterminée. En considérant les corrections en début et en fin de trajectoire, le déroulement temporel passant par les points de passage est calculé. De cette façon, toute la trajectoire a été interpolée aux n points.

Chapitre 10

Contrôle des robots



Le problème du contrôle du robot peut être expliqué comme un calcul des forces ou des couples qui doivent être générés par les actionneurs afin d'accomplir avec succès la tâche du robot. Les conditions de travail appropriées doivent être assurées aussi bien pendant la période transitoire qu'à l'état stationnaire. La tâche du robot peut être présentée soit comme l'exécution des mouvements dans un espace libre, où le contrôle de position est effectué, soit en contact avec l'environnement, où le contrôle de la force de contact est requis. Dans un premier temps, nous étudierons le contrôle de position d'un mécanisme de robot qui n'est pas en contact avec son environnement. Ensuite, dans la suite du texte, nous améliorerons le contrôle de position avec le contrôle de force.

Le problème du contrôle des robots n'est pas unique. Il existe différentes méthodes qui diffèrent par leur complexité et par l'efficacité des actions du robot. Le choix de la méthode de contrôle dépend de la tâche du robot. Une différence importante est, par exemple, entre la tâche où l'effecteur du robot doit suivre avec précision la trajectoire prescrite (par exemple, le soudage au laser) et une autre tâche où il est seulement nécessaire que l'effecteur du robot atteigne la pose finale souhaitée, tandis que les détails de la trajectoire entre le point initial et le point final n'ont pas d'importance (par exemple, la palettisation). La structure mécanique du mécanisme du robot influence également le choix de la méthode de contrôle appropriée. La commande d'un robot manipulateur cartésien diffère en général de la commande d'un robot anthropomorphe.

Le contrôle du robot s'effectue généralement dans le cadre de coordonnées universel, qui est défini par l'utilisateur et est également appelé cadre de coordonnées de la tâche du robot. Au lieu du cadre de coordonnées universel, nous utilisons souvent une expression plus courte, à savoir les coordonnées externes. Nous nous intéressons principalement à la pose de l'effecteur du robot exprimée dans les coordonnées externes et rarement dans les positions articulaires, également appelées coordonnées internes. Néanmoins, nous devons être conscients que dans tous les cas, nous contrôlons directement les coordonnées internes (c'est-à-dire les angles ou les déplacements des articulations). La pose de l'effecteur n'est contrôlée qu'indirectement. Il est déterminé par le modèle cinématique du mécanisme du robot et les valeurs données des coordonnées internes.

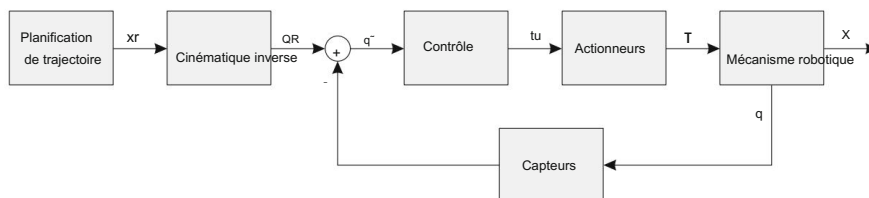


Fig. 10.1 Un système général de contrôle du robot

La figure 10.1 montre un système général de commande de robot. L'entrée du système de contrôle est la pose souhaitée de l'effecteur final du robot, qui est obtenue en utilisant des méthodes d'interpolation de trajectoire, introduites dans le chapitre précédent. La variable x_r représente la pose souhaitée (c'est-à-dire la pose de référence) de l'effecteur final du robot. Le vecteur x , décrivant la pose réelle de l'effecteur du robot, comprend en général six variables. Trois d'entre eux définissent la position du point final du robot, tandis que les trois autres déterminent l'orientation de l'effecteur final du robot. Ainsi, on écrit $x = xyz \quad \psi T$.

La position de l'effecteur terminal du robot est déterminée par le vecteur depuis l'origine du cadre de coordonnées universel jusqu'au point final du robot. L'orientation de l'effecteur terminal peut être présentée de différentes manières. L'une des descriptions possibles est la notation dite RPY, issue de l'aéronautique et illustrée à la Fig. 4.4. L'orientation est déterminée par l'angle α autour de l'axe z (Roll), l'angle β autour de l'axe y (Pitch) et l'angle ψ autour de l'axe x (Yaw).

Par l'utilisation de l'algorithme de cinématique inverse, les coordonnées internes q_r , correspondant à la pose de l'effecteur final souhaitée, sont calculées. La variable q_r représente la position de l'articulation (c'est-à-dire l'angle θ pour l'articulation de rotation et la distance d pour l'articulation de translation). Les coordonnées internes souhaitées sont comparées aux coordonnées internes réelles dans le système de commande du robot. Sur la base de l'erreur de position $\tilde{q} = q_r - q$, la sortie du système de commande u est calculée. La sortie u est convertie d'un signal numérique en un signal analogique, amplifié et délivré aux actionneurs du robot. Les actionneurs assurent les forces ou les couples nécessaires au mouvement requis du robot. Le mouvement du robot est évalué par les capteurs qui ont été décrits dans le chapitre consacré aux capteurs du robot.

10.1 Contrôle du robot en coordonnées internes

L'approche de contrôle de robot la plus simple est basée sur des contrôleurs où la boucle de contrôle est fermée séparément pour chaque degré de liberté particulier. De tels contrôleurs conviennent au contrôle de systèmes indépendants du second ordre avec des paramètres d'inertie et d'amortissement constants. Cette approche est moins adaptée aux systèmes robotiques caractérisés par un comportement non linéaire et variable dans le temps.

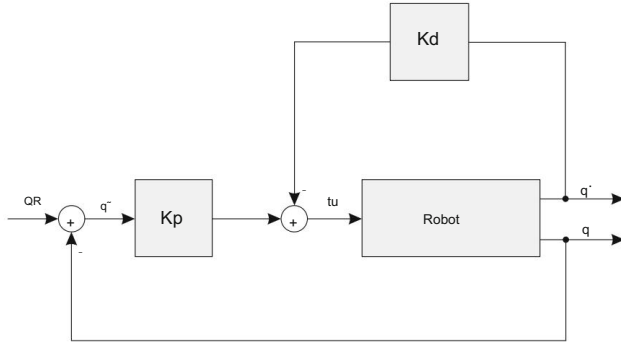


Fig. 10.2 Contrôle de position PD avec amortissement élevé

10.1.1 Contrôle PD de la position

Tout d'abord, un contrôleur proportionnel-dérivé (PD) simple sera analysé. Le schéma de contrôle de base est illustré à la Fig. 10.2. Le contrôle est basé sur le calcul de l'erreur de position et la détermination des paramètres de contrôle, qui permettent de réduire ou de supprimer l'erreur. L'erreur de position est réduite pour chaque articulation séparément, ce qui signifie qu'il faut développer autant de contrôleurs qu'il y a de degrés de liberté. Les positions de référence q_r sont comparées aux positions réelles des articulations du robot q

$$\tilde{q} = q_r - q. \quad (10.1)$$

L'erreur de position $\tilde{q}$ est amplifiée par le gain de position proportionnel K_p . Comme un robot manipulateur a plusieurs degrés de liberté, l'erreur $\tilde{q}$ est exprimée sous forme de vecteur, tandis que K_p est une matrice diagonale des gains de tous les contrôleurs conjoints. L'entrée de commande calculée provoque un mouvement du robot dans le sens de la réduction de l'erreur de position. Comme l'actionnement des moteurs du robot est proportionnel à l'erreur, il peut arriver que le robot dépasse au lieu de s'arrêter dans la position souhaitée. De tels dépassements ne sont pas autorisés en robotique, car ils peuvent entraîner des collisions avec des objets à proximité du robot. Pour garantir des actions sûres et stables du robot, une boucle fermée de vitesse est introduite avec un signe négatif. La boucle fermée de vitesse apporte un amortissement dans le système. Elle est représentée par les vitesses articulaires réelles $\dot{q}$ multipliées par une matrice diagonale de gains de vitesse K_d .

La loi de commande peut s'écrire sous la forme suivante

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q}, \quad (10.2)$$

où u représente les entrées de commande (c'est-à-dire les forces ou couples articulaires), qui doivent être fournies par les actionneurs. De l'éq. (10.2) nous pouvons remarquer qu'à des vitesses plus élevées des mouvements du robot, la boucle de contrôle de vitesse réduit l'actionnement de l'articulation et, en amortissant le système, assure la stabilité du robot.

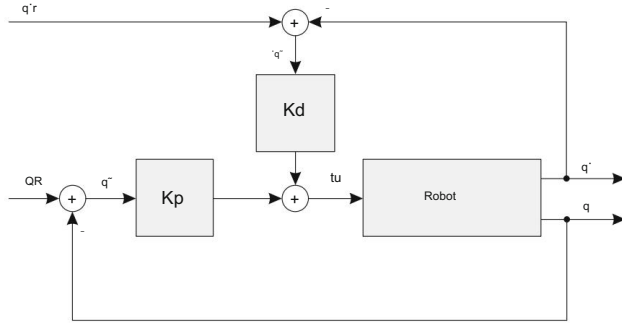


Fig. 10.3 Contrôle de position PD

La méthode de contrôle illustrée à la Fig. 10.2 fournit un amortissement élevé du système dans la partie la plus rapide de la trajectoire, ce qui n'est généralement pas nécessaire. Un tel comportement du contrôleur peut être évité en mettant à niveau le contrôleur PD avec le signal de vitesse de référence. Ce signal est obtenu comme la dérivée numérique de la position souhaitée.

L'erreur de vitesse est utilisée comme entrée de contrôle

$$\dot{q}^e = \dot{q}^r - \dot{q}^e. \quad (10.3)$$

L'algorithme de contrôle démontré dans la Fig. 10.3 peut être écrit comme

$$u = K_p(q^r - q) + K_d(\dot{q}^r - \dot{q}^e). \quad (10.4)$$

Comme la différence entre la vitesse de référence $\dot{q}^r$ et $\dot{q}^e$ est utilisée à la place de la vitesse totale $\dot{q}^e$, l'effet d'amortissement est réduit. Pour une différence positive, la boucle de contrôle peut même accélérer le mouvement du robot.

La synthèse du contrôleur de position PD consiste à déterminer les matrices K_p et K_d .

Pour une réponse rapide, les gains K_p doivent être élevés. Par un choix approprié des gains K_d , un amortissement critique des systèmes robotiques est obtenu. L'amortissement critique assure une réponse rapide sans dépassement. De tels contrôleurs doivent être construits séparément pour chaque articulation. Le comportement de chaque contrôleur est entièrement indépendant des contrôleurs appartenant aux autres articulations du mécanisme du robot.

10.1.2 Contrôle PD de position avec compensation de gravité

Dans le chapitre sur la dynamique du robot, nous avons constaté que le mécanisme du robot est sous l'influence des forces d'inertie, de Coriolis, centripète et gravitationnelle (5.56). En général, les forces de frottement se produisant dans les articulations du robot doivent également être incluses dans le modèle dynamique du robot. Dans un modèle quelque peu simplifié, seul le frottement visqueux, étant proportionnel à la vitesse articulaire, sera pris en compte (F_v est une matrice diagonale de la

coefficients de frottement des articulations). Les forces énumérées doivent être surmontées par les actionneurs du robot, ce qui ressort de l'équation suivante, similaire à Eq. (5.56)

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q) = \tau. \quad (10.5)$$

Lors du développement du contrôleur PD, nous n'avons pas prêté attention aux forces spécifiques influençant le mécanisme du robot. La commande du robot a calculé les forces d'actionnement requises uniquement sur la base de la différence entre les positions d'articulation souhaitées et réelles. Un tel contrôleur ne peut pas prédire la force nécessaire pour produire le mouvement de robot souhaité. Comme la force est calculée à partir de l'erreur de position, cela signifie qu'en général l'erreur n'est jamais égale à zéro. En connaissant le modèle dynamique du robot, nous pouvons prédire les forces nécessaires à l'exécution d'un mouvement particulier du robot. Ces forces sont alors générées par les moteurs du robot quel que soit le signal d'erreur de position.

Dans des conditions quasi-statiques, lorsque le robot est immobile ou se déplace lentement, nous pouvons supposer des accélérations nulles $\ddot{q} \approx 0$ et des vitesses $\dot{q} \approx 0$. Le modèle dynamique du robot est simplifié comme suit

$$\tau \approx g(q). \quad (10.6)$$

Selon l'éq. (10.6), les moteurs du robot doivent avant tout compenser l'effet de gravité. Le modèle des effets gravitationnels $g(q)$ (le circonflexe désigne le modèle du robot), qui est une bonne approximation des forces gravitationnelles réelles $g(q)$, peut être implémenté dans l'algorithme de contrôle illustré à la Fig. 10.4. Le contrôleur PD, illustré à la Fig. 10.2, a été mis à niveau avec une boucle de contrôle supplémentaire, qui calcule les forces gravitationnelles à partir de la position réelle du robot et les ajoute directement à la sortie du contrôleur. L'algorithme de contrôle illustré à la Fig. 10.4 peut être écrit comme suit

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q} + \dot{q} + g(q). \quad (10.7)$$

En introduisant la compensation de gravité, la charge de réduire les erreurs causées par la gravité est retirée au contrôleur PD. De cette manière, les erreurs de suivi de trajectoire sont considérablement réduites.

10.1.3 Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse

Lors de l'étude du contrôleur PD avec compensation de gravité, nous avons étudié le modèle dynamique du robot afin d'améliorer l'efficacité de la méthode de contrôle. Avec la méthode de commande basée sur la dynamique inverse, ce concept sera encore amélioré.

D'après les équations décrivant le comportement dynamique d'un robot manipulateur à deux segments (5.56), nous pouvons clairement observer que le modèle du robot est non linéaire. Un contrôleur linéaire, tel que le contrôleur PD, n'est donc pas le meilleur choix.

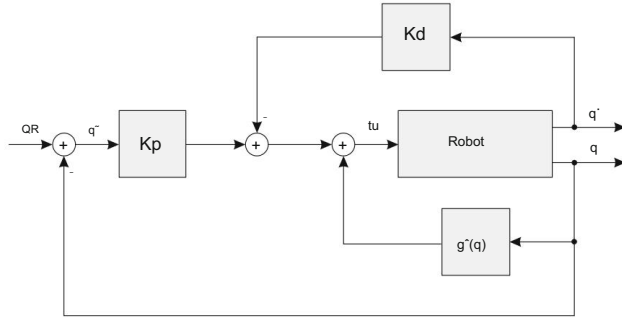


Fig. 10.4 Régulation PD avec compensation de gravité

Nous dériverons le nouveau schéma de contrôle du modèle dynamique du robot décrit par Éq. (10.5). Supposons que les couples τ , générés par les moteurs, soient égaux aux sorties de commande u . L'équation (10.5) peut être réécrite

$$B(q)q'' + C(q, q')q' + Fvq' + g(q) = u. \quad (10.8)$$

Dans l'étape suivante, nous déterminerons le modèle dynamique direct du robot, qui décrit mouvements du robot sous l'influence des couples d'articulation donnés. On exprime d'abord le accélération q'' de l'éq. (10.8)

$$q'' = B^{-1}(q)(u - (C(q, q')q' + Fvq' + g(q))). \quad (10.9)$$

En intégrant l'accélération, tout en tenant compte de la valeur de la vitesse initiale, la vitesse du mouvement du robot est obtenue. En intégrant la vitesse, en prenant en tenant compte de la position initiale, nous calculons les positions réelles dans les articulations du robot. Le modèle dynamique direct d'un mécanisme de robot est illustré à la Fig. 10.5.

Afin de simplifier les équations dynamiques, nous allons définir une nouvelle variable $n(q, q')$, comprenant toutes les composantes dynamiques à l'exception de la composante inertielle

$$n(q, q') = C(q, q')q' + Fvq' + g(q). \quad (10.10)$$

Le modèle dynamique du robot peut être décrit avec l'équation plus courte suivante

$$B(q)q'' + n(q, q') = \tau. \quad (10.11)$$

De la même manière Eq. (10.9) peut aussi s'écrire sous une forme plus courte

$$q'' = B^{-1}(q)(u - n(q, q')). \quad (10.12)$$

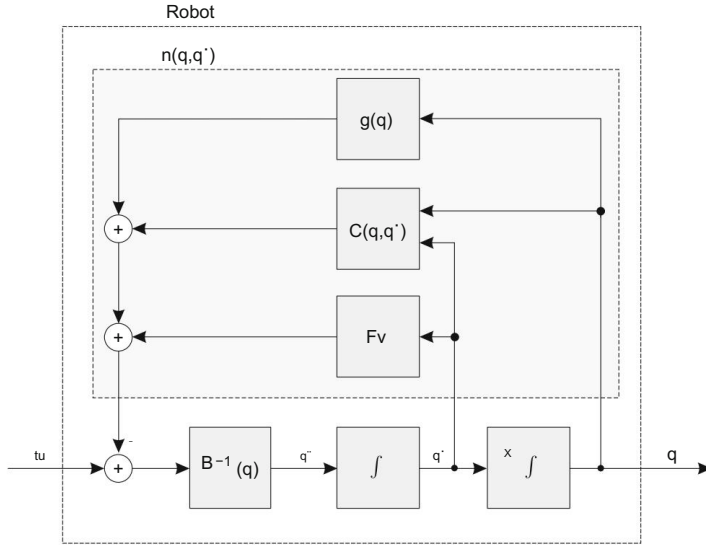


Fig. 10.5 Le modèle dynamique direct d'un mécanisme de robot

Supposons que le modèle dynamique du robot est connu. La matrice inertielle $B^*(q)$ est une approximation des valeurs réelles $B(q)$, tandis que $n^*(q, q^*)$ représente une approximation de $n(q, q^*)$, comme suit

$$n^*(q, q^*) = C^*(q, q^*)q^* + F^*vq^* + g^*(q). \quad (10.13)$$

La sortie du contrôleur u est déterminée par l'équation suivante

$$u = B^*(q)y + n^*(q, q^*), \quad (10.14)$$

où le modèle dynamique inverse approximatif du robot a été utilisé. Le système, combinant les Eqs. (10.12) et (10.14), est illustré à la Fig. 10.6.

Supposons l'équivalence $B^*(q) = B(q)$ et $n^*(q, q^*) = n(q, q^*)$. Sur la Fig. 10.6, nous observons que les signaux $n^*(q, q^*)$ et $n(q, q^*)$ se soustraient, car l'un est présenté avec un signe positif et l'autre avec un signe négatif. De manière similaire, le produit des matrices $B^*(q)$ et $B^{-1}(q)$ donne une matrice unitaire, qui peut être omise. Le système simplifié est illustré à la Fig. 10.7. En mettant en œuvre la dynamique inverse (10.14), le système de commande est linéarisé, car il n'y a que deux intégrateurs entre l'entrée y et la sortie q . Le système est non seulement linéaire, mais aussi découplé (par exemple le premier élément du vecteur y n'influence que le premier élément du vecteur position q).

À partir de la Fig. 10.7, il n'est également pas difficile de se rendre compte que la variable y a les caractéristiques d'accélération, donc

$$y = q^*. \quad (10.15)$$

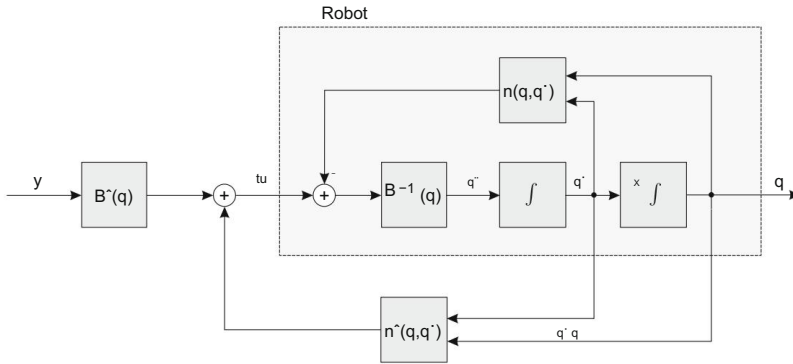


Fig. 10.6 Linéarisation du système de contrôle en implémentant le modèle dynamique inverse

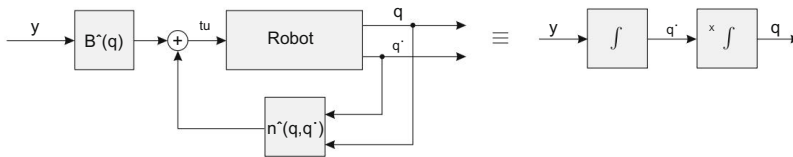


Fig. 10.7 Le système linéarisé

Dans un cas idéal, il suffirait de déterminer les accélérations articulaires souhaitées en tant que dérivées secondes des positions articulaires souhaitées et le système de commande suivra les trajectoires articulaires prescrites. Comme nous ne disposons jamais d'un modèle dynamique entièrement précis du robot, une différence se produira toujours entre les positions articulaires souhaitées et réelles et augmentera avec le temps. L'erreur de position est définie par

$$\ddot{q} = q_r - q, \quad (10.16)$$

où q_r représente la position souhaitée du robot. De la même manière, l'erreur de vitesse peut également être définie comme la différence entre la vitesse souhaitée et la vitesse réelle.

$$\dot{q} = \dot{q}_r - \dot{q}. \quad (10.17)$$

Le vecteur y , ayant les caractéristiques d'accélération, peut maintenant être écrit comme

$$y = \ddot{q}_r + K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}). \quad (10.18)$$

Il se compose de l'accélération de référence $\ddot{q}_r$ et de deux signaux contributifs qui dépendent des erreurs de position et de vitesse. Ces deux signaux suppriment l'erreur résultant de la dynamique imparfaitement modélisée. Le schéma de contrôle complet est illustré à la Fig. 10.8.

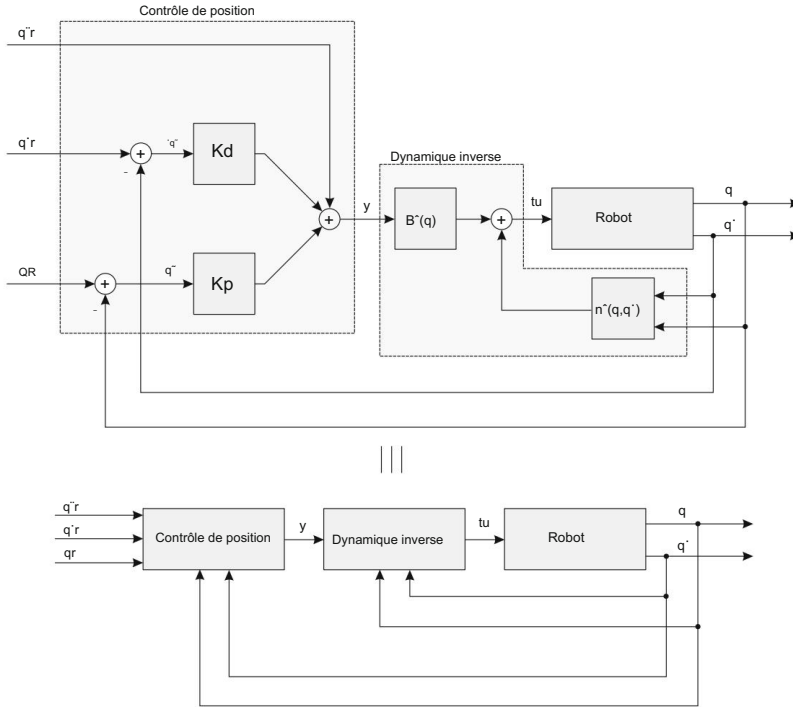


Fig. 10.8 Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse

En considérant l'Eq. (10.18) et l'égalité $y = \ddot{q}$, l'équation différentielle décrivant la dynamique du robot peut s'écrire

$$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0, \quad (10.19)$$

où l'erreur d'accélération $\ddot{q} = \ddot{q}^r - \ddot{q}$ a été introduite. L'Eq différentielle. (10.19) décrit la dépendance temporelle de l'erreur de commande lorsqu'elle s'approche de zéro. La dynamique de la réponse est déterminée par les gains K_p et K_d .

10.2 Contrôle du Robot en Coordonnées Extérieures

Tous les schémas de contrôle étudiés jusqu'à présent étaient basés sur le contrôle des coordonnées internes (c'est-à-dire les positions des articulations). Les positions, vitesses et accélérations souhaitées ont été déterminées par les variables articulaires du robot. Habituellement, nous sommes plus intéressés par le mouvement de l'effecteur final du robot que par les déplacements d'articulations particulières du robot. À la pointe du robot, différents outils sont attachés pour accomplir diverses tâches de robot. Dans la suite du texte, nous nous concentrerons sur le contrôle du robot dans les coordonnées externes.

10.2.1 Contrôle basé sur la matrice jacobienne transposée

La méthode de contrôle est basée sur l'Eq déjà connue. (5.18), reliant les forces agissant au niveau de l'effecteur du robot avec les couples articulaires. La relation est définie par l'utilisation de la matrice jacobienne transposée

$$\tau = J^T(q)f, \quad (10h20)$$

où le vecteur τ représente les couples articulaires et f est la force au point final du robot.

Notre objectif est de contrôler la pose de l'effecteur final du robot, où sa pose souhaitée est définie par le vecteur x_r et la pose réelle est donnée par le vecteur x . Les vecteurs x_r et x comportent en général six variables, trois déterminant la position de l'extrémité du robot et trois l'orientation de l'effecteur, donc $x = xyz \quad \psi T$.

Les robots ne sont généralement pas équipés de capteurs évaluant la pose de l'effecteur terminal ; les capteurs du robot mesurent les variables articulaires. La pose de l'effecteur du robot doit donc être déterminée en utilisant les équations du modèle cinématique direct $x = k(q)$, introduit dans le chapitre sur la cinématique du robot (5.4). L'erreur de position de l'effecteur du robot est calculée comme suit :

$$\tilde{x} = x_r - x = x_r - k(q). \quad (10.21)$$

L'erreur de position doit être réduite à zéro. Un système de contrôle proportionnel simple avec la matrice de gain K_p est introduit

$$f = K_p \tilde{x}. \quad (10.22)$$

Lors de l'analyse de l'Eq. (10.22) de plus près, nous constatons qu'elle nous rappelle l'équation décrivant le comportement d'un ressort (en coordonnées externes), où la force est proportionnelle à l'allongement du ressort. Cette considération nous aide à expliquer le principe de commande introduit. Imaginons qu'il y ait six ressorts virtuellement attachés à l'effecteur final du robot, un ressort pour chaque degré de liberté (trois pour la position et trois pour l'orientation). Lorsque le robot s'éloigne de la pose souhaitée, les ressorts sont allongés et tirent l'effecteur terminal du robot dans la pose souhaitée avec la force proportionnelle à l'erreur de position. La force f pousse donc l'effecteur du robot vers la pose souhaitée. Comme le déplacement du robot ne peut être produit que par les moteurs dans les articulations, les variables contrôlant les moteurs doivent être calculées à partir de la force f . Ce calcul est effectué à l'aide de la matrice jacobienne transposée comme indiqué dans l'équation. (10h20)

$$u = J^T(q)f. \quad (10.23)$$

Le vecteur u représente les couples articulaires souhaités. La méthode de contrôle basée sur la matrice jacobienne transposée est illustrée à la Fig. 10.9.

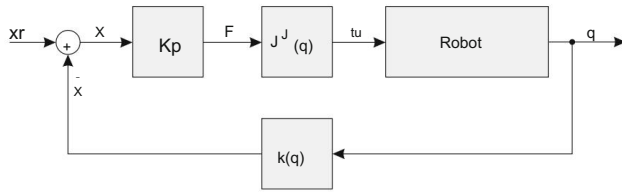


Fig. 10.9 Contrôle basé sur la matrice jacobienne transposée

10.2.2 Contrôle basé sur la matrice jacobienne inverse

La méthode de commande est basée sur la relation entre les vitesses articulaires et les vitesses du point final du robot (5.10), qui est donnée par la matrice jacobienne. Dans l'éq. (5.10) on insiste sur les dérivées temporelles des coordonnées externes x et des coordonnées internes q

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad \frac{dx}{dt} = J(q) \frac{dq}{dt} \quad (10.24)$$

Comme dt apparaît dans le dénominateur des deux côtés de l'équation. (10.24), il peut être omis. De cette façon, nous obtenons la relation entre les changements des coordonnées internes et les changements de la pose du point final du robot

$$dx = J(q)dq. \quad (10h25)$$

L'équation (10.25) n'est valable que pour les petits déplacements.

Comme avec la méthode de contrôle précédemment étudiée, basée sur la matrice jacobienne transposée, nous pouvons également dans ce cas d'abord calculer l'erreur de la pose du point final du robot en utilisant l'Eq. (10.21). Lorsque l'erreur dans la pose est faible, on peut calculer l'erreur de position dans les coordonnées internes par la relation inverse (10.25)

$$\tilde{q} = J^{-1}(q)\tilde{x}. \quad (10.26)$$

De cette manière, la méthode de commande est traduite en méthode connue de commande de robot dans les coordonnées internes. Dans l'exemple le plus simple, basé sur le contrôleur proportionnel, nous pouvons écrire

$$u = K_p \tilde{q}. \quad (10.27)$$

L'équation décrit le comportement d'un ressort (en coordonnées internes). La méthode de contrôle, basée sur la matrice jacobienne inverse, est illustrée à la Fig. 10.10.

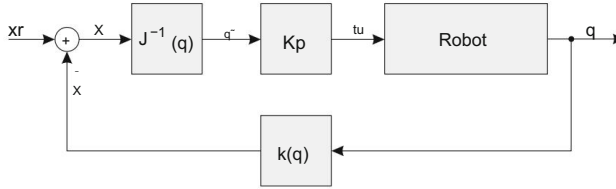


Fig. 10.10 Contrôle basé sur la matrice jacobienne inverse

10.2.3 Contrôle PD de position avec compensation de gravité

Le contrôle PD de position avec compensation de gravité a déjà été étudié en détail pour les coordonnées internes. Nous allons maintenant dériver l'algorithme de contrôle analogique dans les coordonnées externes. Le point de départ sera l'équation. (10.21), exprimant l'erreur de la pose de l'effecteur final. La vitesse du point final du robot est calculée avec à l'aide de la matrice jacobienne à partir des vitesses articulaires

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.28)$$

L'équation décrivant le contrôleur PD en coordonnées externes est analogue à celle écrite dans les coordonnées internes (10.2)

$$f = K_p \tilde{x} - K_d \dot{\tilde{x}}. \quad (10.29)$$

Dans l'éq. (10.29), l'erreur de pose est multipliée par la matrice des gains positionnels K_p , tandis que l'erreur de vitesse est multipliée par la matrice K_d . Le signe négatif de la l'erreur de vitesse introduit un amortissement dans le système. Les couples articulaires sont calculés de la force f , agissant à la pointe du robot, à l'aide du jacobien transposé matrice (de la même manière que dans l'équation (10.23)) et en ajoutant la composante compensant gravité (comme dans l'équation (10.7)). L'algorithme de contrôle s'écrit

$$u = J^T(q)f + g(q). \quad (10h30)$$

Le schéma de contrôle complet est illustré à la Fig. 10.11.

10.2.4 Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse

Dans le chapitre sur le contrôle des robots dans les coordonnées internes, les éléments suivants contrôleur basé sur la dynamique inverse a été introduit

$$u = B(q)y + n(q, \dot{q}). \quad (10.31)$$

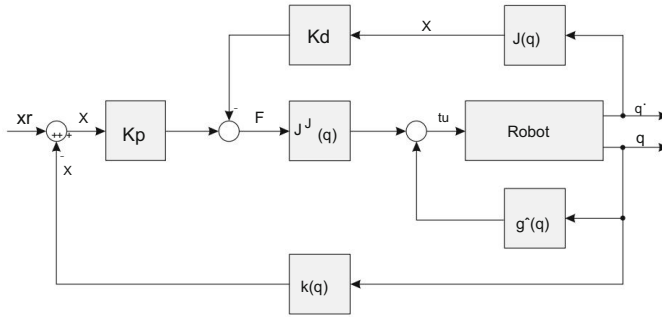


Fig. 10.11 Régulation PD avec compensation de gravité en coordonnées externes

Nous avons également appris que le vecteur y a les caractéristiques d'accélération

$$y = \ddot{q}, \quad (10.32)$$

qui a été déterminé de manière à ce que le robot suive la trajectoire souhaitée exprimée en coordonnées internes. Comme notre objectif est de développer une méthode de contrôle dans les coordonnées externes, le signal y doit être adapté de manière adéquate. Équation (10.31), linéarisant le système, reste inchangé.

On repartira de l'équation reliant les vitesses articulaires au robot vitesses de l'effecteur final

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.33)$$

En calculant la dérivée temporelle de l'Eq. (10.33), on obtient

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}. \quad (10.34)$$

L'erreur de pose de l'effecteur du robot est déterminée comme la différence entre sa pose désirée et sa pose réelle

$$\tilde{x} = x_r - x = x_r - k(q). \quad (10h35)$$

De la même manière, l'erreur de vitesse de l'effecteur du robot est déterminée

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x}_r - \dot{x} = \dot{x}_r - J(q)\dot{q}. \quad (10.36)$$

L'erreur d'accélération est la différence entre l'accélération souhaitée et l'accélération réelle

$$\ddot{\tilde{x}} = \ddot{x}_r - \ddot{x}. \quad (10.37)$$

Lors du développement du contrôleur basé sur la dynamique inverse dans les coordonnées internes, Éq. (10.19) a été dérivé décrivant la dynamique de l'erreur de contrôle sous la forme

$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0$. Une équation analogue peut être écrite pour l'erreur de pose de l'effecteur terminal. A partir de cette équation, l'accélération $\ddot{x}$ de l'effecteur du robot peut être exprimée

$$\ddot{x} + K_d \dot{x} + K_p x = 0 \quad \ddot{x} = \ddot{x}_r + K_d \dot{x} + K_p x. \tag{10.38}$$

De l'éq. (10.34) on exprime $\ddot{q}$ en tenant compte de l'égalité $y = \ddot{x}$

$$y = J^{-1}(q) \ddot{x} - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \tag{10.39}$$

En remplaçant $\ddot{x}$ dans Eq. (10.39) avec l'expression (10.38), l'algorithme de commande basé sur la dynamique inverse dans les coordonnées externes est obtenu

$$y = J^{-1}(q) \ddot{x}_r + K_d \dot{x} + K_p x - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \tag{10h40}$$

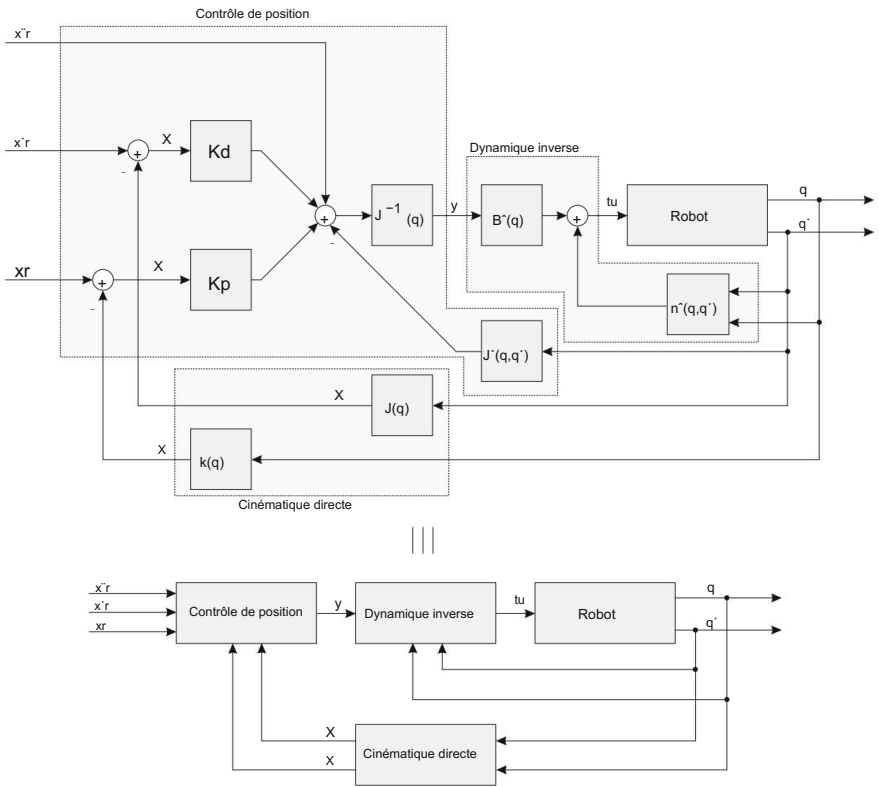


Fig. 10.12 Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse en coordonnées externes

Le schéma de contrôle englobant la linéarisation du système basé sur la dynamique inverse (10.31) et le contrôle en boucle fermée (10.40) est illustré à la Fig. 10.12.

10.3 Contrôle de la force de contact

Le contrôle de position est suffisant lorsqu'un robot manipulateur suit une trajectoire en espace libre. Lorsqu'un contact se produit entre l'effecteur terminal du robot et l'environnement, le contrôle de la position n'est pas une approche appropriée. Imaginons un robot manipulateur nettoyant une vitre avec une éponge. Comme l'éponge est très souple, il est possible de contrôler la force entre le robot et la fenêtre en contrôlant la position entre la pince du robot et la fenêtre. Si l'éponge est suffisamment compliant et que l'on connaît assez précisément la position de la fenêtre, le robot accomplira convenablement la tâche.

Si la compliance de l'outil robot ou de son environnement est moindre, alors il n'est pas si simple d'exécuter les tâches qui nécessitent un contact entre le robot et son environnement. Imaginons maintenant un robot grattant de la peinture sur une surface vitreuse à l'aide d'un outil rigide. Toute incertitude dans la position de la surface vitreuse ou un dysfonctionnement du système de contrôle du robot empêchera une exécution satisfaisante de la tâche ; soit le verre se brisera, soit le robot ondulera inutilement dans les airs.

Dans les deux tâches du robot, c'est-à-dire nettoyer une fenêtre ou gratter une surface lisse, il est plus raisonnable qu'au lieu de la position de la surface vitreuse, nous déterminions la force que le robot doit exercer sur l'environnement. La plupart des robots industriels modernes effectuent des tâches relativement simples, telles que le soudage par points, la peinture au pistolet et diverses opérations point à point. Cependant, plusieurs applications robotiques nécessitent un contrôle de la force de contact. Un exemple caractéristique est le meulage ou une tâche d'usinage robotisée similaire. Un domaine important de la robotique industrielle est également l'assemblage de robots, où plusieurs composants doivent être assemblés. Dans de telles tâches robotiques, la détection et le contrôle des forces sont de la plus haute importance.

Le fonctionnement précis d'un robot manipulateur dans un environnement incertain, non structuré et changeant est nécessaire pour une utilisation efficace des robots dans une tâche d'assemblage. Ici, plusieurs composants doivent être assemblés avec une grande précision. La mesure et le contrôle des forces de contact permettent d'atteindre la précision de position requise du robot manipulateur. Comme des mesures relatives sont utilisées dans le contrôle de la force du robot, les erreurs absolues de positionnement du manipulateur ou de l'objet ne sont pas aussi critiques que dans le contrôle de la position du robot. Lorsqu'il s'agit d'objets rigides, déjà de petits changements de position produisent de grandes forces de contact. La mesure et le contrôle de ces forces peuvent conduire à une précision de position nettement supérieure du mouvement du robot.

Lorsqu'un robot exerce une force sur l'environnement, nous traitons deux types de tâches robotiques. Dans le premier cas, nous aimerions que l'effecteur terminal du robot soit amené dans une pose souhaitée pendant que le robot est en contact avec l'environnement. C'est le cas de l'assemblage de robots. Un exemple caractéristique est celui de l'insertion d'une cheville dans un trou. Le mouvement du robot doit être de nature telle que la force de contact soit réduite à zéro ou à une valeur minimale autorisée. Dans le deuxième type de tâche de robot, nous demandons au robot

effecteur terminal pour exercer une force prédéterminée sur l'environnement. C'est l'exemple du meulage robotisé. Ici, le mouvement du robot dépend de la différence entre la force de contact souhaitée et la force de contact réellement mesurée.

La méthode de contrôle de la force du robot sera basée sur le contrôle du robot en utilisant la dynamique inverse. Du fait de l'interaction du robot avec l'environnement, une composante supplémentaire, représentant la force de contact f , apparaît dans le modèle dynamique inverse. Comme les forces agissant au niveau de l'effecteur du robot sont transformées en couples articulaires par l'utilisation de la matrice jacobienne transposée (5.18), nous pouvons écrire le modèle dynamique du robot sous la forme suivante

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q)f. \quad (10.41)$$

A droite de l'Eq. (10.5) nous avons ajouté la composante $-J^T(q)f$ qui représente l'interaction avec l'environnement. On peut voir que la force f agit à travers la matrice jacobienne transposée de la même manière que les couples articulaires (c'est-à-dire qu'elle essaie de produire un mouvement de robot). Le modèle (10.41) peut être réécrit sous une forme plus courte en introduisant

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q), \quad (10.42)$$

ce qui nous donne le modèle dynamique suivant d'un robot en contact avec son environnement

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau - J^T(q)f. \quad (10.43)$$

10.3.1 Linéarisation d'un système de robot par dynamique inverse

Désignons la sortie de commande, représentant les couples d'actionnement souhaités dans les articulations du robot, par le vecteur u . L'équation (10.43) peut s'écrire comme suit

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) + J^T(q)f = u. \quad (10.44)$$

De l'éq. (10.44) on exprime le modèle dynamique direct

$$\ddot{q} = B^{-1}(q)u - n(q, \dot{q}) - J^T(q)f. \quad (10.45)$$

L'équation (10.45) décrit la réponse du système de robot à l'entrée de commande u .

En intégrant l'accélération, tout en tenant compte de la valeur de vitesse initiale, la vitesse réelle du mouvement du robot est obtenue. En intégrant la vitesse, tout en tenant compte de la position initiale, on calcule les positions réelles dans les articulations du robot. Le modèle décrit est représenté par le bloc Robot sur la Fig. 10.13.

De la même manière que lors du développement de la méthode de commande basée sur la dynamique inverse, nous allons linéariser le système en incluant le modèle dynamique inverse dans la boucle fermée

$$u = B^*(q)y + n^*(q, \dot{q}) + J^T(q)f, \quad (10.46)$$

L'utilisation de circonflexe désigne les paramètres estimés du système de robot. La différence entre les Eqs. (10.46) et (10.14), représentant la commande basée sur la dynamique inverse en coordonnées internes, est la composante $J^T(q)f$, compenser l'influence externes sur le mécanisme du robot. Le schéma de contrôle, combinant les Eqs. (10.45) et (10.46), est illustré à la Fig. 10.13. En supposant que les paramètres estimés sont égaux aux paramètres réels du robot, on peut observer, qu'en introduisant la boucle fermée (10.46), le système est linéarisé car il n'y a que deux intégrateurs entre l'entrée y et la sortie q , comme déjà démontré à la Fig. 10.7.

10.3.2 Commande de force

Après linéarisation du système de commande, le vecteur d'entrée y doit être déterminé. Le contrôle de la force sera traduit en contrôle de la pose de l'effecteur terminal. Ceci peut être, de manière simplifiée, expliqué par le raisonnement suivant : si l'on souhaite que le robot augmente la force exercée sur l'environnement, l'effecteur du robot doit être déplacé dans le sens de l'action de la force. Nous pouvons maintenant utiliser le système de contrôle qui a été développé pour contrôler le robot dans les coordonnées externes (10.40).

Le schéma de contrôle de l'effecteur du robot, y compris la linéarisation, tout en tenant compte de la force de contact, est illustré à la Fig. 10.14.

Jusqu'à présent, nous avons principalement résumé les connaissances du contrôle de la pose de l'effecteur du robot comme expliqué dans les chapitres précédents. Dans l'étape suivante, nous déterminerons la pose, la vitesse et l'accélération souhaitées de l'effecteur final du robot, sur la base de la force mesurée entre le point final du robot et son environnement.

Supposons que l'on souhaite contrôler une force de consigne constante f_r . Avec le capteur de force au poignet, la force de contact f est mesurée. La différence entre la force souhaitée et la force mesurée représente l'erreur de force

$$\tilde{f} = f_r - f. \quad (10.47)$$

Le mouvement désiré du robot sera calculé en supposant que la force $\tilde{f}$ doit déplacer un objet virtuel avec une inertie B_c et un amortissement F_c . Dans notre cas, l'objet virtuel est en fait l'effecteur du robot. Pour une meilleure compréhension, considérons un système à un seul degré de liberté. Lorsqu'une force agit sur un tel système, un mouvement accéléré s'enclenche. Le mouvement sera déterminé par la force, la masse de l'objet et l'amortissement. L'effecteur du robot se comporte donc comme un système composé d'une masse et d'un amortisseur, qui sont sous l'influence de la

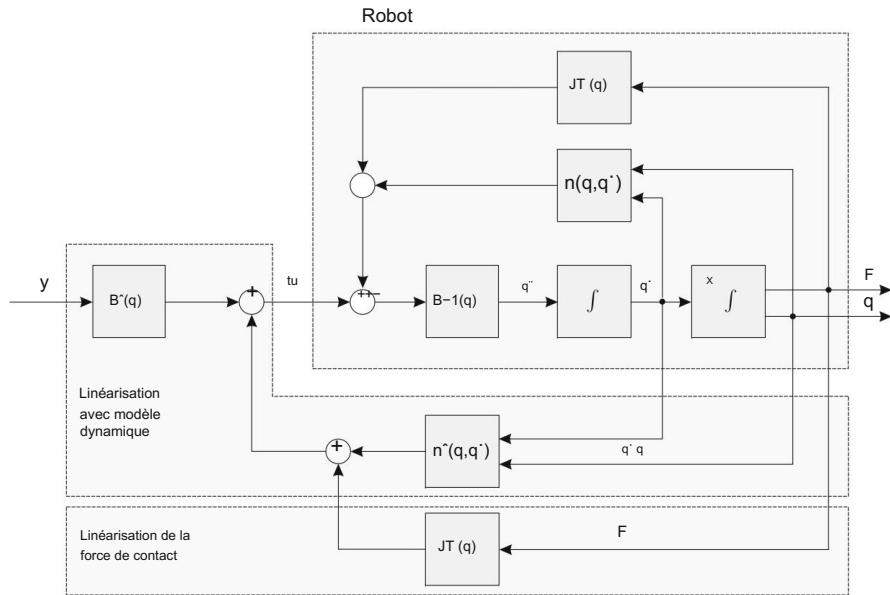


Fig. 10.13 Linéarisation du système de commande en mettant en œuvre le modèle dynamique inverse et la force de contact mesurée

robot | \$ | @

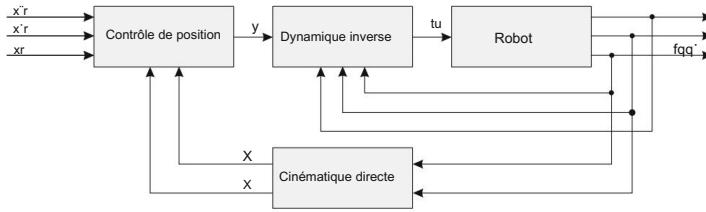


Fig. 10.14 Contrôle du robot basé sur la dynamique inverse en coordonnées externes, y compris la force de contact

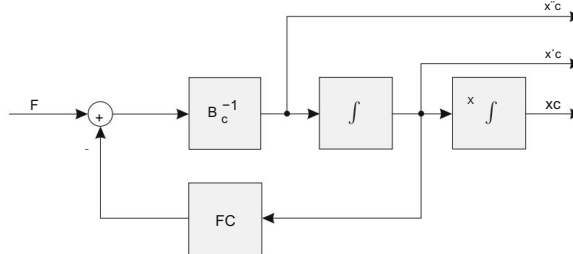


Fig. 10.15 Contrôle de la force traduit en contrôle de la pose de l'effecteur du robot

force $\tilde{f}$. Pour plus de degrés de liberté, nous pouvons écrire l'équation différentielle suivante décrivant le mouvement de l'objet

$$\tilde{f} = B_c \ddot{x}^c + F_c \dot{x}^c. \quad (10.48)$$

Les matrices B_c et F_c déterminent le mouvement de l'objet sous l'influence de la force $\tilde{f}$. De l'éq. (10.48) l'accélération de l'objet virtuel peut être calculée

$$\ddot{x}^c = B_c^{-1} \tilde{f} - F_c \dot{x}^c. \quad (10.49)$$

En intégrant l'Eq. (10.49), les vitesses et la pose de l'objet sont calculées, comme le montre la Fig. 10.15. De cette manière, la pose de référence x^c , la vitesse de référence $\dot{x}^c$ et l'accélération de référence $\ddot{x}^c$ sont déterminées à partir de l'erreur de force. Les variables calculées sont des entrées du système de contrôle, illustré à la Fig. 10.14. De cette manière, le contrôle de la force a été traduit dans le contrôle du robot déjà connu en coordonnées externes.

Afin de contrôler également simultanément la pose de l'effecteur du robot, une composition parallèle est incluse. La composition parallèle suppose que les variables de contrôle de référence sont obtenues en additionnant les références pour le contrôle de la force (x^c , $\dot{x}^c$, $\ddot{x}^c$) et les références pour le contrôle de la pose (x^d , $\dot{x}^d$, $\ddot{x}^d$). La composition parallèle est définie par les équations

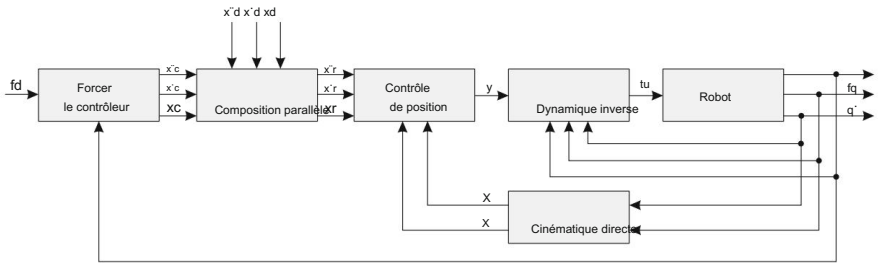


Fig. 10.16 Contrôle direct de la force dans les coordonnées externes

$$\begin{aligned} x_r &= x_d + x_c \\ \dot{x}_r &= \dot{x}_d + \dot{x}_c \\ \ddot{x}_r &= \ddot{x}_d + \ddot{x}_c \end{aligned} \tag{10h50}$$

Le système de contrôle incorporant le contrôle de la force de contact, la composition parallèle et le contrôle du robot basé sur la dynamique inverse en coordonnées externes est illustré à la Fig. 10.16. Le contrôle de la force est obtenu en sélectionnant

$$\begin{aligned} x_r &= x_c \\ \dot{x}_r &= \dot{x}_c \\ \ddot{x}_r &= \ddot{x}_c \end{aligned} \tag{10.51}$$

La méthode de contrôle décrite permet le contrôle de la force. Cependant, il ne permet pas un contrôle indépendant de la pose de l'effecteur terminal du robot car il est déterminé par l'erreur dans le signal de force.

Chapitre 11

Environnement robotique



Ce chapitre illustrera les environnements de robots, illustrés par des processus d'assemblage de produits où les robots font partie d'une chaîne de production ou en tant qu'unités complètement indépendantes. L'exemple peut également être facilement reproduit pour d'autres tâches, telles que l'inspection et les tests de produits, le soudage, la peinture, les opérations de prélèvement et de placement, etc.

En effet, les robots représentent une solution idéale à de nombreux problèmes de sécurité et de santé industrielle, principalement parce qu'ils sont capables d'effectuer des tâches pénibles et fatigantes dans un environnement dangereux. Les robots de soudage et de peinture permettent aux travailleurs humains d'éviter les fumées et les vapeurs toxiques. Les robots chargent également les presses mécaniques, qui étaient des causes fréquentes de blessures chez les travailleurs dans le passé. Les robots travaillent dans les fonderies et les environnements radioactifs. Avec le nombre croissant de robots dans les processus industriels, il existe cependant un danger accru introduit par les robots eux-mêmes. Ainsi, la prise en compte de la sécurité est de la plus haute importance lors de la conception d'une cellule de travail robotisée.

11.1 Sécurité des robots

Les robots industriels sont des appareils puissants qui se déplacent rapidement dans leur espace de travail. Dans la plupart des cas, un accident ne se produit que lorsqu'un travailleur humain entre dans l'espace de travail du robot. Une personne entre dans le voisinage du robot accidentellement ou même sans le savoir ou dans le but de reprogrammer ou d'entretenir le robot. Il est souvent difficile pour un opérateur humain de juger quel sera le prochain mouvement du robot. Les mouvements inattendus du robot, qui sont la conséquence soit d'une panne du robot, soit d'une erreur de programmation, sont particulièrement dangereux. De nombreuses organisations gouvernementales et grandes entreprises, ainsi que des fabricants de robots, ont élaboré des normes de sécurité. Les approches assurent une coopération sûre des travailleurs humains et des robots industriels peuvent être divisées en trois grands groupes : (1) les fonctions de sécurité du robot, (2) les protections de l'espace de travail du robot et (3) la formation et la supervision du personnel.

Les robots d'aujourd'hui ont déjà en grande partie des fonctions de sécurité intégrées pour les trois modes de fonctionnement : travail normal, programmation et maintenance. Les fonctions d'évitement des pannes augmentent la fiabilité et la sécurité du robot. Une telle caractéristique, par exemple, empêche le robot d'atteindre la presse avant qu'elle ne soit ouverte. Les dispositifs de sécurité intégrés à l'unité de commande du robot permettent généralement la synchronisation entre le robot et d'autres machines dans l'environnement du robot. La vérification des signaux, indiquant quand un appareil est prêt à prendre une part active dans la cellule robotisée, doit faire partie d'une programmation sûre du robot. L'utilisation de capteurs fiables joue un rôle important lors de la vérification de l'état des machines dans la zone de travail du robot. Les caractéristiques de sécurité importantes de tout système de robot sont également les arrêts logiciels et électriques.

Lors de la programmation ou de l'apprentissage d'un robot, l'opérateur humain doit se trouver dans la zone de travail du robot. Dans la phase de programmation, la vitesse des mouvements du robot doit être considérablement plus faible que pendant le travail normal. La vitesse du robot doit être réduite à une valeur telle que l'opérateur humain puisse éviter les mouvements inattendus du robot. La vitesse maximale recommandée du robot, lorsqu'il y a un travailleur humain à l'intérieur de l'espace de travail, est de 0,25 m/s.

Le pupitre d'apprentissage peut être un composant essentiel pour un fonctionnement sûr du robot. Les erreurs de programmation lors de l'apprentissage d'un robot provoquent souvent des mouvements de robot inattendus. La conception d'un pupitre d'apprentissage peut avoir un impact significatif sur la sécurité de fonctionnement. L'utilisation de la manette de commande s'est avérée plus sûre que l'utilisation de boutons-poussoirs de commande. La taille des boutons-poussoirs d'urgence a également une influence importante sur les temps de réaction de l'opérateur humain.

Des caractéristiques de sécurité spéciales facilitent la maintenance du robot en toute sécurité. Une telle caractéristique est, par exemple, la possibilité d'allumer le système de contrôle, alors que le bras du robot n'est pas alimenté. Une autre caractéristique permet un mouvement manuel passif des segments du robot, tandis que les actionneurs du robot sont éteints. Certaines fonctionnalités du robot provoquent l'arrêt du robot dès que possible, tandis que d'autres permettent au système de contrôle d'exécuter la commande en cours et de s'arrêter ensuite.

La plupart des accidents de robots se produisent lorsque des personnes pénètrent intentionnellement ou par négligence dans la zone de travail du robot. Les protections de l'espace de travail du robot empêchent une telle entrée dans la cellule du robot. Il existe trois approches principales pour la protection de l'espace de travail du robot : (1) barrières et clôtures, (2) détection de présence et (3) panneaux d'avertissement, signaux et lumières.

Le plus souvent, des barrières ou des clôtures métalliques sont utilisées pour empêcher les travailleurs non autorisés d'entrer dans la zone de travail du robot. La couleur de la clôture joue un rôle important, avertissant efficacement le personnel non averti. Les clôtures sont également une protection adéquate contre divers véhicules utilisés pour le transport de matériaux dans le hall de production. Une ouverture sécurisée des portes, qui permettent l'entrée dans la zone clôturée, doit également être prévue. Un opérateur humain ne peut entrer qu'après avoir éteint le système de robot à l'aide d'un panneau de commande à l'extérieur des barrières. Des barrières de protection bien conçues peuvent également protéger les passants des objets qui s'envolent hors de la portée du robot.

Une sécurisation importante est assurée par les dispositifs détectant la présence d'une personne dans la zone de travail du robot. Il peut s'agir de tapis de sol sensibles à la pression, de barrières immatérielles, de capteurs d'effecteurs terminaux, de divers capteurs à ultrasons, capacitifs, infrarouges ou micro-ondes à l'intérieur de la cellule robotisée et de la vision par ordinateur. Des tapis de sol instrumentés ou des barrières immatérielles peuvent détecter l'entrée d'une personne dans la zone de travail du robot. Dans un tel

cas où un signal d'avertissement est déclenché et le fonctionnement normal du robot peut être arrêté. Les capteurs de l'effecteur terminal détectent les collisions inattendues avec des objets dans l'environnement du robot et provoquent un arrêt d'urgence. Les capteurs sans contact et la vision par ordinateur détectent diverses intrusions dans la zone de travail du robot.

Les panneaux d'avertissement, les signaux et les lumières peuvent dans une large mesure augmenter le fonctionnement sûr des cellules robotisées. Ces panneaux d'avertissement alertent les opérateurs de la présence d'une situation dangereuse. Les manuels d'instructions et une formation appropriée sont également importants pour une utilisation efficace des panneaux d'avertissement. De tels panneaux sont plus efficaces avec les personnes qui entrent involontairement dans la zone de travail du robot qu'avec les opérateurs qui connaissent le fonctionnement de la cellule robotisée. Les opérateurs expérimentés négligent souvent les avertissements et entrent intentionnellement dans l'espace de travail du robot sans éteindre le robot afin de gagner un peu de temps. Ces déplacements sont souvent à l'origine d'accidents. Les fausses alarmes peuvent également réduire l'efficacité des avertissements.

La sélection de travailleurs qualifiés, une formation à la sécurité et une supervision appropriée sont les conditions préalables pour travailler en toute sécurité avec des robots. Les moments particulièrement critiques sont le démarrage et l'arrêt d'une cellule robotisée. De même, la maintenance et la programmation des robots peuvent être dangereuses. Certaines applications robotiques (par exemple le soudage) comportent des situations dangereuses spécifiques qui doivent être bien connues des travailleurs. Les personnes employées dans l'environnement robotique doivent satisfaire à la fois aux exigences physiques et mentales de leur travail. La sélection des travailleurs appropriés est une première étape importante. La deuxième étape, tout aussi importante, est une formation approfondie à la sécurité. Une sécurité satisfaisante n'est atteinte qu'avec une surveillance constante des employés. Une formation supplémentaire est un élément important de l'application des robots industriels. Dans les cours de formation, les travailleurs doivent être informés des dangers possibles et de leur gravité. Ils doivent apprendre à identifier et à éviter les situations dangereuses. Les erreurs courantes qui sont à l'origine d'accidents doivent être expliquées en détail. Ces formations sont généralement préparées avec l'aide de fabricants de robots.

Il est prévu que les futurs robots ne fonctionneront pas derrière des gardes de sécurité avec des portes verrouillées ou des barrières lumineuses. Au lieu de cela, ils travailleront en étroite collaboration avec les humains, ce qui conduit à la préoccupation fondamentale de savoir comment assurer une interaction physique sûre entre l'homme et le robot. Les progrès majeurs sont attendus dans la conception de segments de robots flexibles légers, d'articulations souples, de nouveaux actionneurs et d'algorithmes de contrôle avancés.

L'installation du robot peut être une cellule robotisée individuelle ou faire partie d'une plus grande chaîne de production industrielle. Les robots industriels sont contrôlés en position et souvent sans capteurs pour détecter leur environnement. Pour cette raison, les robots doivent être isolés de l'environnement humain en cas d'activité inappropriée du robot ou de ses parties périphériques, afin d'éviter des blessures humaines ou des collisions avec d'autres équipements dans la cellule de travail du robot. Le risque de sécurité pour chaque cellule robotisée individuelle doit être défini afin que les précautions appropriées puissent être prises. Un comportement incorrect du robot peut être le résultat d'une défaillance du système du robot ou d'une erreur humaine, telle que :

- comportement imprévisible du robot en raison d'un défaut dans le système de commande, •
- défaut de connexion des câbles en raison du mouvement du robot, •
- erreur de transfert de données produisant un mouvement imprévisible du robot, •
- défaut de l'outil du robot, par exemple pistolet de soudage, •

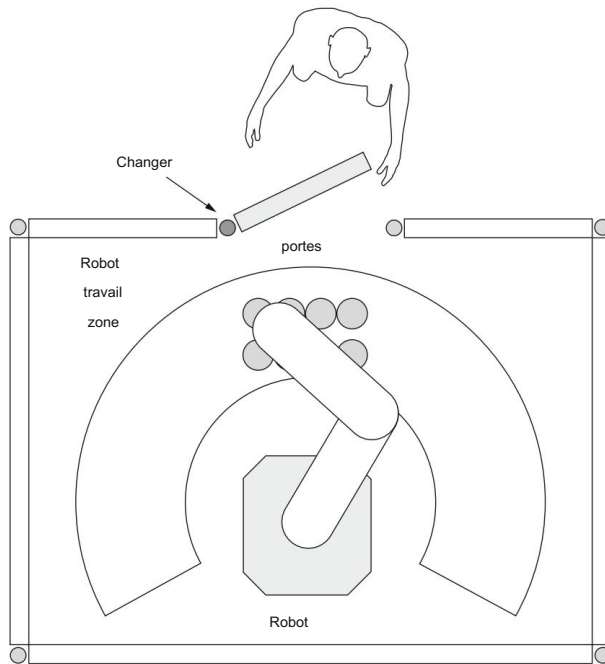


Fig. 11.1 Niveau 1 : protection mécanique de la cellule robotisée

- erreurs logicielles, •
- composants mécaniques du robot utilisés.

Les dangers potentiels de défaillances du système résultant de ces erreurs peuvent être divisés en trois catégories :

- Le risque de collision est la possibilité que le robot en mouvement ou l'outil attaché au robot heurte l'opérateur.
- Le danger de pincement est une situation dans laquelle le robot, pendant le mouvement à proximité des objets dans la cellule du robot (par exemple, les mécanismes de transport), comprime l'opérateur.
- D'autres dangers spécifiques à chaque application de robot, tels que le risque de choc électrique, l'impact de l'arc de soudage, les brûlures, les substances toxiques, les radiations, les niveaux sonores excessifs.

Pour toutes ces raisons, les exigences de sécurité du robot peuvent être divisées en trois niveaux.

Le niveau 1 est le niveau de protection de l'ensemble de la cellule robotisée. Il est généralement réalisé avec une protection physique utilisant une combinaison de clôtures mécaniques, de garde-corps et de portails (Fig. 11.1). Parallèlement à la protection physique, un capteur de présence humaine (par exemple des rideaux laser) peut être installé.

Le niveau 2 comprend un niveau de protection lorsqu'un opérateur se trouve dans la zone de travail du robot. Normalement, la protection est assurée par des capteurs de présence. Contrairement au niveau précédent qui repose principalement sur la protection mécanique, le niveau 2 est basé sur la perception de la présence des opérateurs (Fig. 11.2).

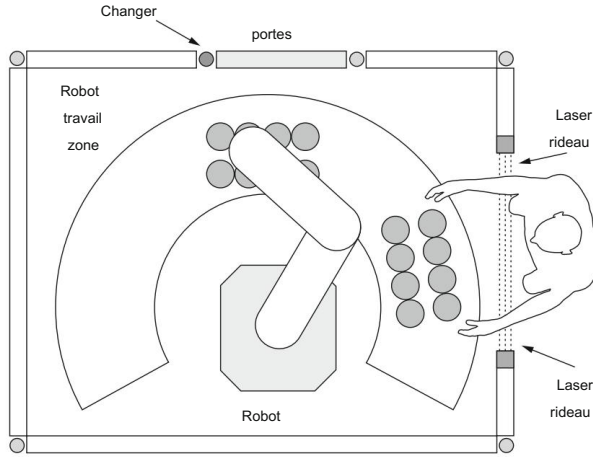


Fig. 11.2 Niveau 2 : protection opto-électrique de la cellule robotisée

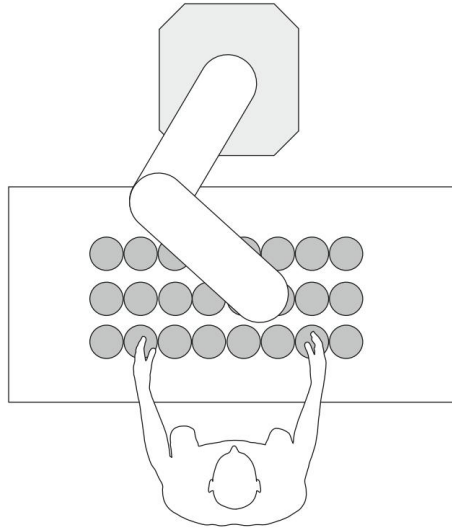


Fig. 11.3 Niveau 3 : collaboration de l'homme et du robot

Le niveau 3 est le niveau de protection où les personnes sont en contact avec le robot dit robots collaboratifs. La sécurité à ce niveau est réalisée en détectant la présence d'un humain ou d'obstacles à proximité du robot ou lorsque le robot et l'humain sont en collaboration (Fig. 11.3). Dans les situations à risque, le système de robot doit ralentir ou s'arrêter. Ces systèmes intègrent des capteurs pour le suivi humain, divers capteurs de force et de couple et des capteurs de contact ou tactiles. Les robots collaboratifs sont décrits plus en détail au Chap. 12.

11.2 Périphériques de robot dans les processus d'assemblage

Les systèmes de robots installés dans l'industrie font généralement partie de lignes de production dédiées plus importantes. Les lignes de production sont utilisées pour la production à grand volume de pièces où de multiples opérations de traitement sont nécessaires. La chaîne de production est divisée en postes de travail où des travailleurs humains, des machines dédiées ou des robots effectuent les tâches nécessaires. D'autres périphériques peuvent également être incorporés pour augmenter les capacités de la ligne de production. Les périphériques correctement sélectionnés augmentent également la fiabilité, la flexibilité et l'efficacité du système.

11.2.1 Configurations de la chaîne de production d'assemblage

Les lignes de production d'assemblage dans l'industrie se composent de bandes transporteuses, de palettes se déplaçant avec des bandes transporteuses, de systèmes de vision, de vérins pneumatiques, de différents capteurs et de robots ou manipulateurs. Les palettes permettent d'indexer, de localiser et de suivre les pièces fabriquées individuelles qui traversent le processus d'automatisation. Les robots offrent de la flexibilité et peuvent être intégrés dans n'importe quelle configuration de ligne de production. Les configurations de ligne de production d'assemblage les plus courantes avec l'assistance d'un robot sont :

- En ligne (direct, en L, en U, circulaire, rectangulaire), • Rotatif, • Hybride.

Dans la Fig. 11.4, un exemple de ligne de production circulaire en ligne est présenté. Les postes de travail en ligne sont desservis par des humains, des machines dédiées et des robots. Pièces pour assemblage

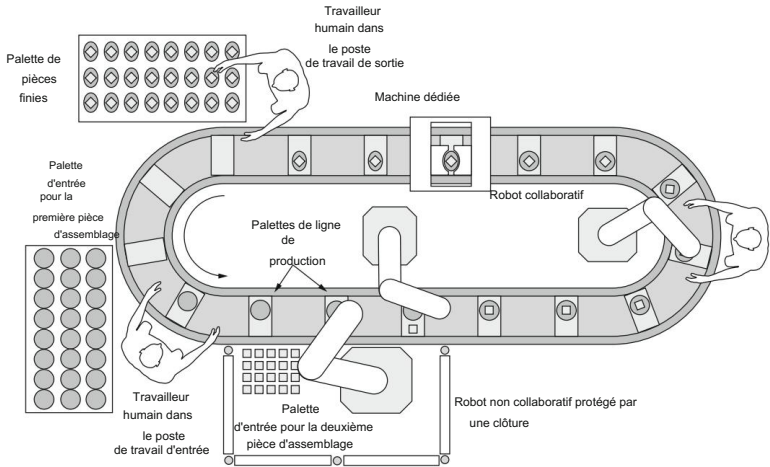


Fig. 11.4 Exemple de ligne de production d'assemblage en ligne circulaire avec postes de travail humains, machines et robots

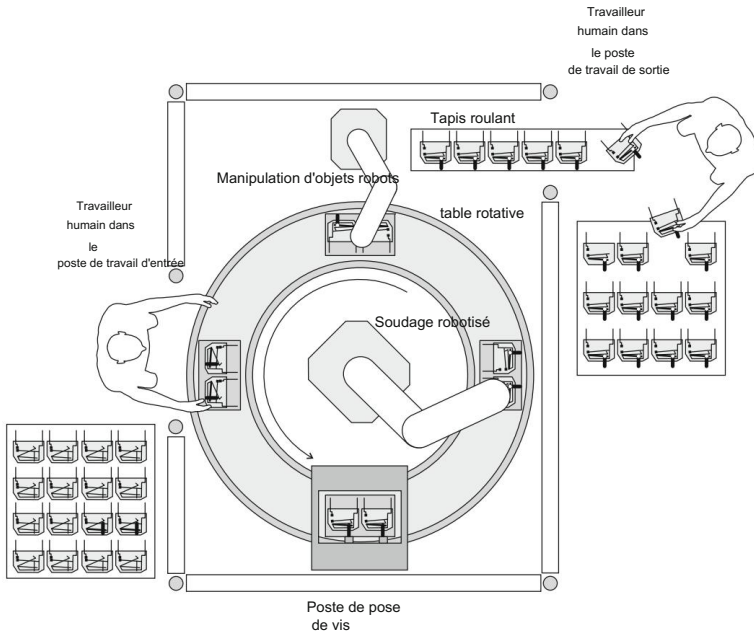


Fig. 11.5 Exemple de ligne de production à table tournante avec postes de travail humains, machines et robots

ment sont manipulés à la main ou par le robot et transférés entre les postes de travail par des palettes le long d'un tapis roulant. La distance entre les palettes n'est pas nécessairement constante et leur position est surveillée par des capteurs de localisation, généralement des capteurs de présence capacitifs ou inductifs. Ces capteurs sont nécessaires pour signaler aux robots ou à une machine dédiée que la palette est dans la bonne position et que l'opération du poste de travail peut être effectuée. Le temps de cycle pour transporter la pièce d'un poste de travail à l'autre est généralement constant, ce qui rend les postes de travail synchrones. Dans certains cas, les développeurs de la ligne de production intègrent des pièces pour tamponner les palettes, rendant la ligne de production asynchrone. Le besoin d'un tampon se fait sentir dans les cas où certains postes de travail ont des temps de cycle variables ; avec un tampon, le temps de cycle global de la ligne de production n'est pas affecté.

Une autre configuration de chaîne de montage très courante est une table tournante ou rotative (Fig. 11.5), généralement actionnée par des moteurs électriques. La vitesse et la répétabilité du positionnement sont élevées. La table rotative est souvent appelée table à cadran ou machine à indexer. L'avantage de la configuration rotative est qu'elle nécessite moins d'espace au sol et est souvent moins chère que les autres configurations de ligne de production. La table rotative effectue toujours un transfert synchrone des pièces entre les postes de travail avec un temps de cycle constant.

Comme dans l'exemple précédent, cette configuration peut également être desservie par des humains, des robots ou des machines dédiées. La table rotative a une forme circulaire autour de laquelle les palettes ou les porte-pièces se déplacent et transportent les pièces, à tour de rôle, dans chaque manuel

ou poste de travail automatisé où sont effectuées les opérations de production. La table rotative peut être divisée en plusieurs postes de travail (minimum 2), ce qui rend l'angle de rotation de 90°.

Plus courantes sont les tables rotatives avec plus de 2 postes de travail, par exemple 4, 5, 6 postes de travail. La taille de la table rotative est définie par la taille de la pièce, la taille de l'équipement et le nombre de postes de travail de la ligne de production rotative. Des platines tournantes contrôlées en boucle fermée sont également disponibles.

Habituellement, une combinaison des configurations ci-dessus est installée et est appelée configuration de ligne de production hybride. Plusieurs facteurs déclarent la configuration globale de la ligne de production, tels que :

- espace nécessaire à la ligne de production, •
- coût d'installation de la ligne de production, • temps de
- cycle de la ligne de production.

11.3 Dispositifs d'alimentation

La tâche des dispositifs d'alimentation est d'apporter des pièces ou des assemblages au robot ou à la machine dédiée de manière à ce que la pose de la pièce soit connue. Le fonctionnement fiable des dispositifs d'alimentation est de la plus haute importance dans les cellules robotisées sans vision robotique. La position d'une pièce doit être précise, car l'effecteur du robot se déplace toujours le long de la même trajectoire et la pièce est censée être toujours au même endroit.

Les exigences pour les dispositifs d'alimentation du robot sont beaucoup plus strictes que dans le cas d'un assemblage manuel, à moins que la cellule robotisée ne soit équipée d'un système de vision robotique. Les dispositifs d'alimentation du robot ne doivent pas déformer les pièces, doivent fonctionner de manière fiable, positionner les pièces avec précision, travailler à une vitesse suffisante, nécessiter un temps de chargement minimal et contenir un nombre suffisant de pièces.

Le dispositif d'alimentation ne doit pas endommager les pièces manipulées, car les pièces endommagées seraient ensuite insérées par le robot dans des ensembles qui ne peuvent pas fonctionner correctement. Le coût de tels ensembles endommagés est supérieur au coût d'un dispositif d'alimentation plus fiable. Le dispositif d'alimentation doit traiter de manière fiable toutes les pièces dont les dimensions sont dans les limites de tolérance. Il doit également être suffisamment rapide pour répondre aux exigences de l'ensemble du temps de cycle de la chaîne de production et ne doit jamais ralentir son fonctionnement. En outre, le dispositif d'alimentation doit nécessiter le moins de temps possible pour le chargement des pièces. Il est plus souhaitable de remplir une grande quantité de pièces dans le dispositif d'alimentation en une seule fois que de les insérer manuellement une par une. Les dispositifs d'alimentation doivent contenir le plus grand nombre de pièces possible. De cette façon, le nombre de chargements requis par jour est réduit.

Les dispositifs d'alimentation les plus simples sont les palettes et les montages ; un exemple quotidien est le carton ou les palettes en plastique utilisées pour les œufs. Les palettes stockent les pièces, tout en déterminant leur position et parfois aussi leur orientation. Dans une situation idéale, la même palette est utilisée pour expédier les pièces du fournisseur et pour une utilisation ultérieure dans la cellule robotisée du consommateur. Les palettes sont soit chargées automatiquement par une machine, soit manuellement. Les pièces fragiles, les objets flexibles ou les pièces aux formes étranges doivent être chargées manuellement. Chargement de

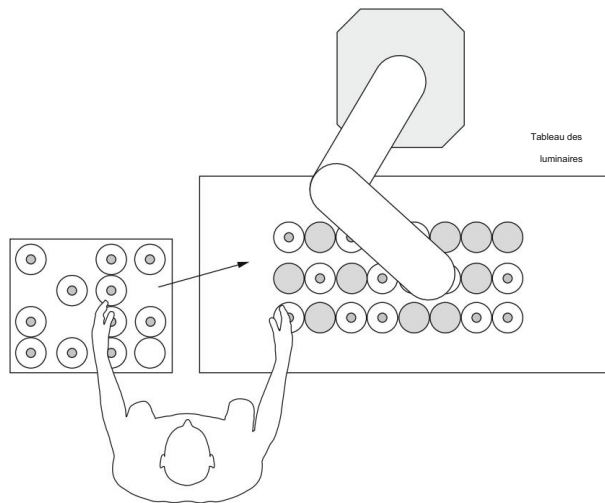


Fig. 11.6 Chargement simultané d'une table d'appareils

les palettes représentent le point le plus faible de la palettisation. Un autre inconvénient des palettes est leur surface assez importante, occupant une place considérable dans l'espace de travail du robot.

La manière la plus simple d'amener des pièces dans la cellule robotisée est représentée par une table de montage. L'opérateur humain prend une pièce d'un conteneur, où les pièces ne sont pas triées, et la place sur la table de montage à l'intérieur de l'espace de travail du robot (Fig. 11.6). La table de montage doit contenir des rainures spéciales qui assurent un positionnement fiable d'une pièce dans l'espace de travail du robot. Une telle table de montage est souvent utilisée dans le soudage où les composants doivent également être serrés sur la table avant que le soudage robotisé n'ait lieu. Le temps requis pour le soudage robotisé est considérablement plus long que le chargement et le déchargement, ce qui peut justifier l'utilisation d'une table de montage.

Les palettes peuvent être chargées à l'avance à un autre endroit et ensuite amenées dans la cellule robotisée (Fig. 11.7). Cela évite une longue période d'attente pour le robot pendant que l'opérateur humain charge les palettes. Le travailleur humain doit uniquement amener la palette dans l'espace de travail du robot et la positionner correctement à l'aide de goupilles spéciales dans la table de travail. Il est important que la palette contienne un nombre suffisant de pièces pour permettre un fonctionnement continu du robot. L'échange des palettes dans l'espace de travail du robot représente un problème de sécurité car l'opérateur doit éteindre le robot ou la cellule robotisée doit être équipée d'autres solutions de sécurité (par exemple table rotative ou robot collaboratif).

Un plus grand nombre de palettes peut être placé sur une table rotative (Fig. 11.8). La table rotative permet le chargement des palettes d'un côté, tandis que les activités du robot se déroulent de l'autre côté du plateau tournant. De cette façon, l'inactivité de la cellule du robot est considérablement réduite et l'opérateur humain est protégé contre les mouvements du robot.

Il existe généralement trois types de palettes utilisées : les palettes formées sous vide ou moulées par injection en plastique et en métal. Étant donné que le coût des palettes formées sous vide est faible,

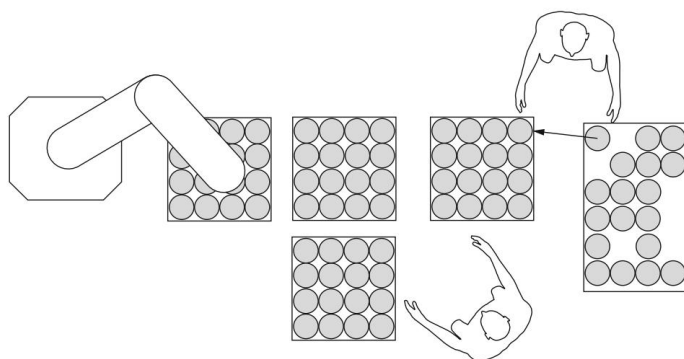


Fig. 11.7 Chargement préalable des palettes

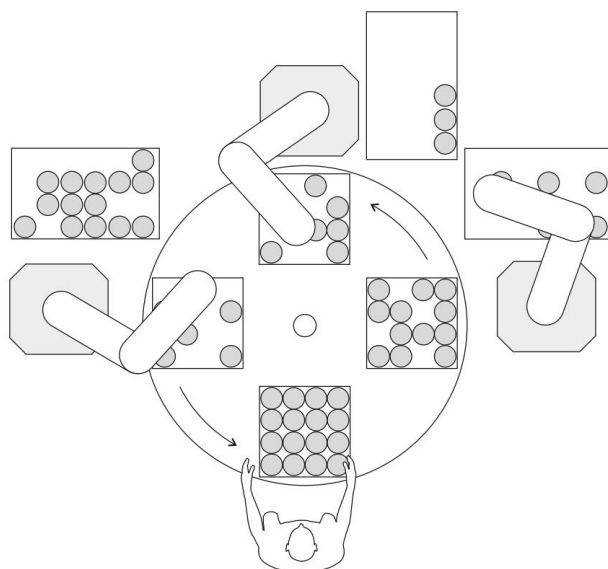


Fig. 11.8 Table tournante avec étages de palettes

ils sont utilisés à la fois pour l'emballage et l'expédition des pièces et pour une utilisation dans la cellule robotisée. Des trous de référence doivent être intégrés dans toutes les palettes pour correspondre aux goupilles de la table de travail afin de permettre un positionnement simple et rapide. Comme les palettes formées sous vide sont peu coûteuses, il n'est pas difficile de comprendre qu'elles ne sont pas les plus précises, fiables ou durables. Ils sont constitués d'une fine feuille de matière plastique qui est chauffée et formée sous vide sur un moule. L'imprécision de la palette est la conséquence de sa faible rigidité. Les palettes en plastique moulées par injection sont utilisées lorsque des palettes plus précises et plus durables sont requises. La production du moule est assez chère, alors que le coût de production d'une seule palette n'est pas élevé. Nous devons garder à l'esprit que la plupart des palettes en plastique sous vide et moulées sont inflammables. Les palettes métalliques sont

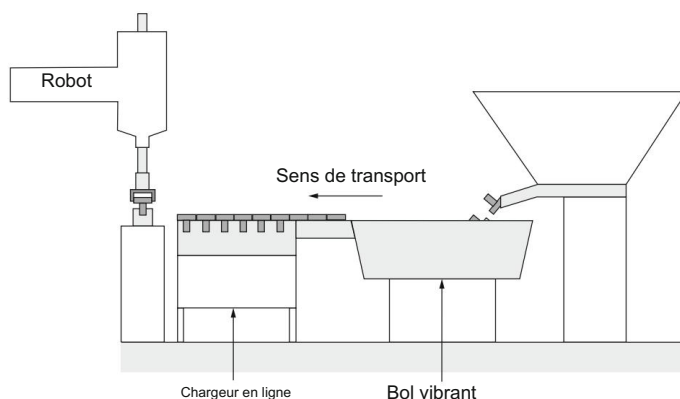


Fig. 11.9 Bol vibrant

qui sont ininflammables. Ils sont produits par diverses approches d'usinage. Les palettes métalliques sont les plus fiables et les plus durables, tandis que leur coût est supérieur à celui du type plastique. Ils ne sont donc utilisés qu'à l'intérieur du processus d'assemblage du robot.

Les chargeurs de pièces représentent une autre famille intéressante de dispositifs d'alimentation qui sont utilisés non seulement pour stocker des pièces, mais aussi pour les positionner et même les orienter dans la pose appropriée pour la préhension du robot. Les plus courants sont les bols vibrants (Fig. 11.9). Ici, les pièces sont chargées de manière désordonnée dans le bol. La vibration du bol et de l'alimentateur en ligne est produite par un électroaimant, et la vibration appropriée est obtenue en fixant les alimentateurs vibrants à une grande masse, généralement une table en acier épaisse. Les vibrations font sortir les pièces du bol. Des clôtures en forme de spirale spécialement formées les forcent dans l'orientation requise. Le même bol vibrant peut être utilisé pour différentes pièces, mais pas en même temps. Un autre avantage est que le bol peut contenir un grand nombre de pièces tout en n'occupant qu'une petite surface dans l'espace de travail du robot. Les bols d'alimentation ne sont pas appropriés pour des pièces telles que des objets en caoutchouc souple ou des ressorts. Un autre inconvénient est l'endommagement possible causé par le coincement des pièces dans le bol. Le bruit des mangeoires vibrantes peut également être dérangerant.

Un alimentateur de magasin simple est constitué d'un tube stockant les pièces et de la plaque coulissante, actionnée pneumatiquement ou électriquement, qui sort les pièces une à une du magasin (Fig. 11.10). Le magasin est chargé manuellement, de sorte que l'orientation des pièces est connue. La gravité pousse les pièces dans la plaque coulissante. Le mécanisme de la plaque coulissante doit être conçu de manière à éviter le coincement des pièces, alors qu'une seule pièce est sortie du chargeur à la fois. La plaque coulissante doit bloquer toutes les pièces sauf celle du bas.

Les chargeurs de magasin sont d'excellentes solutions pour la manipulation de circuits intégrés (Fig. 11.11). Les circuits intégrés sont déjà expédiés dans des tubes qui peuvent être utilisés à des fins d'alimentation. Le chargeur de magasin pour circuits intégrés se compose généralement de

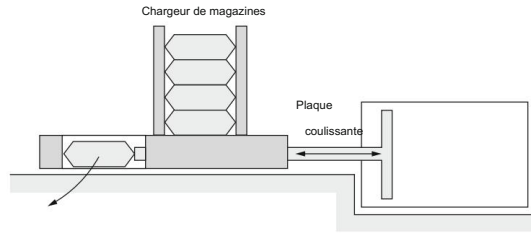


Fig. 11.10 Chargeur de magasin

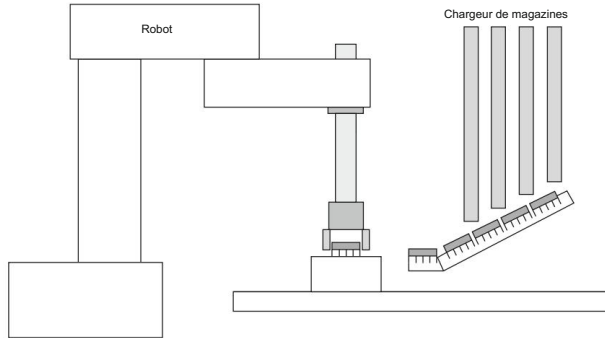


Fig. 11.11 Chargeur de magasin de circuits intégrés

plusieurs tubes. Les tubes sont alignés le long d'un alimentateur en ligne vibrant. Le principal inconvénient des chargeurs de magasin est le chargement manuel. Ils sont également inappropriés pour la manipulation de gros objets.

11.4 Convoyeurs

Les convoyeurs sont utilisés pour le transport de pièces, d'assemblages ou de palettes entre les cellules robotisées. Le convoyeur le plus simple utilise une chaîne en plastique ou en métal qui pousse les palettes le long d'un guide métallique (Fig. 11.12). Un moteur électrique entraîne la chaîne à vitesse constante. La force motrice est représentée par le frottement entre la chaîne et la palette. La palette est arrêtée par des goupilles spéciales actionnées par des vérins pneumatiques. La chaîne continue de glisser contre le fond de la palette. Lorsqu'une autre palette arrive, elle est arrêtée par la première. De cette manière, une file de palettes est obtenue devant la cellule robotisée.

Le virage d'un convoyeur s'effectue en pliant le guide métallique. Les avantages du convoyeur à chaîne coulissante sont le faible coût et la simplicité de manipulation des palettes et d'exécution des virages. L'inconvénient est qu'il est impossible de réaliser des intersections perpendiculaires. De plus, les virages doivent être effectués en arcs larges, ce qui prend beaucoup de place au sol.

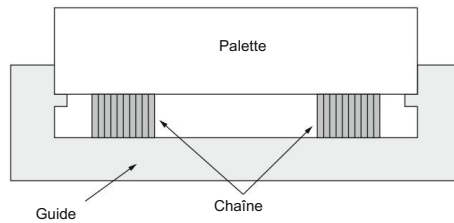


Fig. 11.12 Convoyeur à chaîne coulissant (vue en bout)

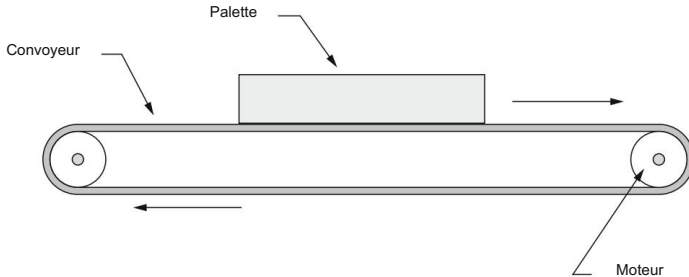


Fig. 11.13 Convoyeur à bande

place dans l'usine de production. Le convoyeur à chaîne coulissante est le mieux adapté lorsqu'il est utilisé comme système d'alimentation à boucle unique.

Avec le convoyeur à courroie, la partie supérieure de la courroie entraîne des palettes ou d'autres objets ou matériaux (Fig. 11.13). Un virage ou une intersection est réalisé à l'aide d'un dispositif spécial permettant le levage, le transfert et la rotation des palettes.

Un convoyeur peut également être constitué de rouleaux actionnés par un arbre d'entraînement commun (Fig. 11.14). L'arbre d'entraînement transmet le couple à travers une courroie d'entraînement à l'arbre du rouleau. L'avantage du convoyeur à rouleaux réside dans les faibles forces de collision se produisant entre les palettes ou les objets manipulés par le convoyeur. Ils sont la conséquence d'un faible frottement entre les rouleaux et les palettes. Les virages sont effectués à l'aide de dispositifs de levage et de transfert. Les inconvénients des convoyeurs à rouleaux sont le coût élevé et les faibles accélérations.

11.5 Préhenseurs et outils robotisés

De la même manière que les robots manipulateurs sont des copies du bras humain, les robots préhenseurs imitent la main humaine. Dans la plupart des cas, les préhenseurs de robots sont considérablement plus simples que la main humaine, englobant le poignet et les doigts, au total 22 degrés de liberté.

Les préhenseurs de robots industriels diffèrent dans une large mesure, il n'est donc pas difficile de comprendre que leur coût varie de presque négligeable à supérieur au coût d'une manipulation de robot.

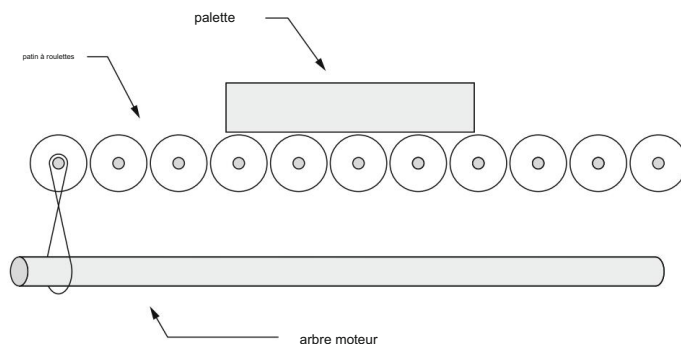


Fig. 11.14 Convoyeur à rouleaux

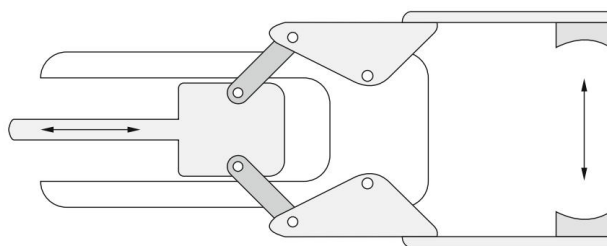


Fig. 11.15 Pince du robot à deux doigts

ulateur. Bien que de nombreux préhenseurs robotisés soient disponibles dans le commerce, il est souvent nécessaire de développer un préhenseur spécial pour répondre aux exigences d'une tâche robotique spécifique.

Les préhenseurs de robots les plus caractéristiques sont ceux avec les doigts. Ils peuvent être divisés en pinces à deux doigts (Fig. 11.15) et pinces à plusieurs doigts. La plupart des pinces multidoigts ont trois doigts (Fig. 11.16), pour obtenir une meilleure préhension. Dans les applications industrielles, nous rencontrons généralement des pinces à deux doigts. Les pinces à deux doigts les plus simples ne sont contrôlées qu'entre les deux états, ouvert et fermé. Des pinces à deux doigts, où la distance ou la force entre les doigts peuvent être contrôlées, sont également disponibles. Les pinces à plusieurs doigts ont généralement trois doigts, chacun ayant trois segments. Un tel préhenseur a 9 degrés de liberté, ce qui est plus qu'un robot manipulateur. Le coût de telles pinces est élevé. Dans les pinces à plusieurs doigts, les moteurs ne sont souvent pas placés dans les articulations des doigts, car les doigts peuvent devenir lourds ou ne pas être assez solides. Au lieu de cela, les moteurs sont tous placés dans la paume de la pince, tandis que les tendons les relient à des poulies dans les articulations des doigts. Outre les pinces à doigts, il existe également dans la robotique industrielle des pinces à vide, magnétiques, à perforation et adhésives. Les différents outils effecteurs, utilisés dans la peinture au pistolet, la finition ou le soudage, ne sont pas considérés comme des préhenseurs robotisés.

Des pinces à deux doigts sont utilisées pour saisir les pièces dans un processus d'assemblage robotisé. Un exemple d'un tel préhenseur est illustré à la Fig. 11.15. Différents points finaux peuvent

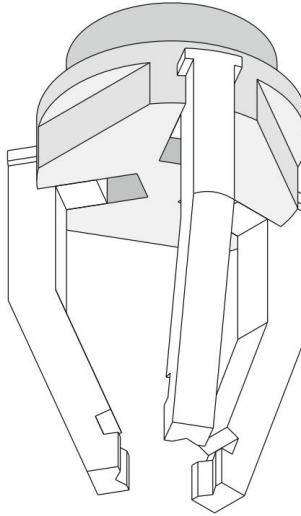


Fig. 11.16 Pince robotisée à trois doigts

être attaché aux doigts pour adapter la préhension du robot à la forme et à la surface de la pièce ou de l'assemblage à saisir. Avec les pinces robotisées à deux doigts, des moteurs pneumatiques, hydrauliques ou électriques sont utilisés. L'actionnement hydraulique permet des forces de préhension plus élevées et donc la manipulation d'objets plus lourds. Différentes structures de pinces à deux doigts sont présentées à la Fig. 11.17. Des présentations cinématiques simples permettent de choisir un préhenseur approprié pour la tâche sélectionnée. Le préhenseur sur le côté droit de la Fig. 11.17 permet une saisie parallèle des doigts.

Dans les processus industriels, les robots manipulateurs sont souvent utilisés pour le chargement des machines. Dans de tels cas, le robot est plus efficace lorsqu'il utilise un préhenseur double. Le robot peut simultanément amener une pièce non finie dans la machine tout en retirant une pièce finie. Une pince double est illustrée à la Fig. 11.18.

Des pinces spécifiques sont utilisées pour saisir des objets chauds. Ici, les actionneurs sont placés loin des doigts. Lors de la manipulation d'objets chauds, un refroidissement par air est appliqué, tandis que souvent la pince est immergée dans l'eau dans le cadre du cycle de manipulation. Le choix du matériau approprié pour les doigts est également de la plus haute importance.

Lors de la saisie d'objets légers et fragiles, des pinces à doigts à ressort peuvent être utilisées. De cette façon, la force de préhension maximale est limitée, tout en permettant en même temps une manière simple d'ouvrir et de fermer les doigts. Un exemple de pince simple avec deux doigts à ressort est illustré à la Fig. 11.19.

La forme de l'objet nécessite une conception minutieuse d'un préhenseur de robot à deux doigts. Une préhension fiable peut être obtenue soit par la forme soit par la force de fermeture des deux doigts. La combinaison des deux modes de préhension est également possible (Fig. 11.20).

Lors de l'exécution d'une prise de robot à deux doigts, la position des doigts par rapport à l'objet est également importante. La force de préhension ne peut être appliquée que sur l'extérieur

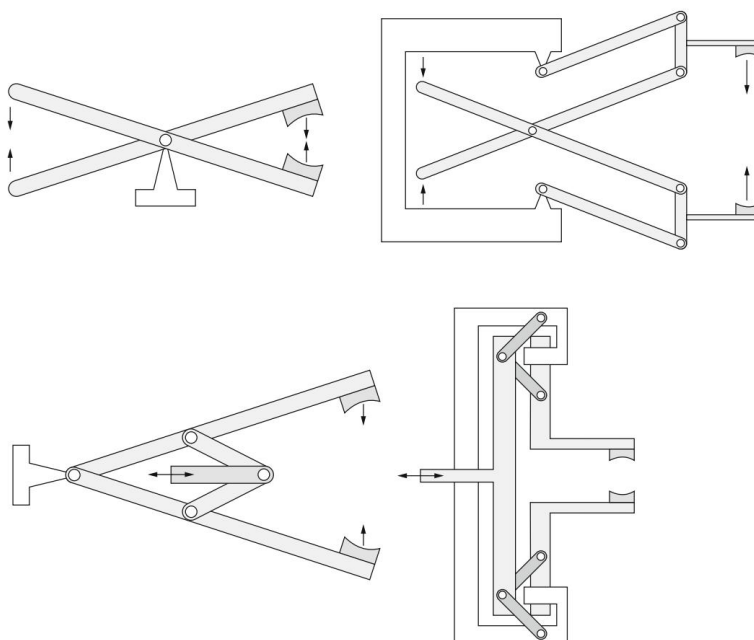


Fig. 11.17 Présentations cinématiques des pinces à deux doigts

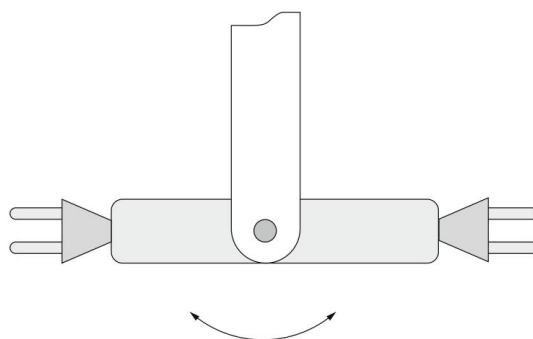


Fig. 11.18 Pince robot double

surfaces ou seulement sur les surfaces internes d'une pièce. Une prise intermédiaire est également possible lorsque l'objet est saisi sur des surfaces internes et externes (Fig. 11.21).

Parmi les préhenseurs robotisés sans doigts, les préhenseurs à vide sont de loin les plus utilisés. Les pinces à vide ou les pinces à pression négative sont appliquées avec succès dans les cas où la surface de l'objet saisi est plate ou uniformément courbée, lisse, sèche et relativement propre. Les avantages de ces pinces sont la fiabilité, le faible coût et le faible poids. Des têtes d'aspiration de différentes formes sont disponibles dans le commerce.

Souvent, plusieurs têtes d'aspiration sont utilisées ensemble, étant placées dans un modèle qui convient à la

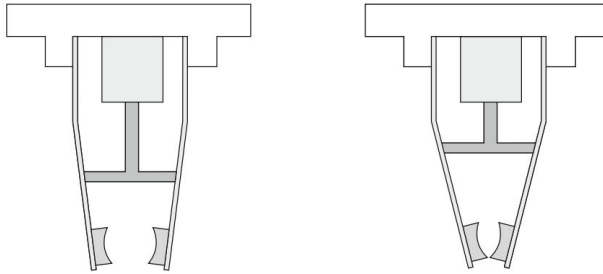


Fig. 11.19 Pince avec doigts à ressort

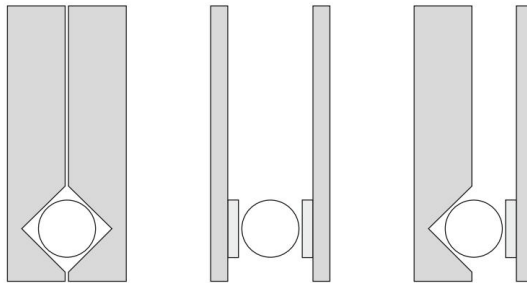


Fig. 11.20 Fermeture de forme, fermeture forcée et prise combinée

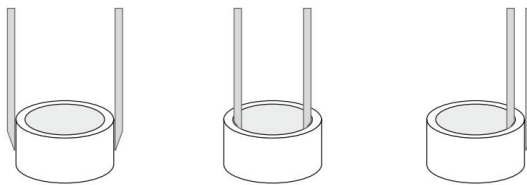


Fig. 11.21 Prise externe, interne et intermédiaire

forme de l'objet à saisir. La figure 11.22 montre la forme de deux têtes d'aspiration fréquemment utilisées. La tête à gauche est appropriée dans les cas où la surface n'est pas complètement lisse. Le matériau souple de la tête s'adapte à la forme de l'objet.

De petits mamelons sur la tête présentés sur le côté droit de la Fig. 11.22 empêchent l'endommagement de la surface de l'objet. Le vide est produit soit avec Venturi, soit avec des pompes à vide.

La pompe Venturi a besoin de plus de puissance et ne produit que 70 % de vide. Cependant, il est souvent utilisé dans les procédés industriels en raison de sa simplicité et de son faible coût. Les pompes à vide fournissent 90 % de vide et produisent considérablement moins de bruit. Dans toutes les pinces, une saisie et une libération rapides des objets sont requises. La libération d'objets très légers et collants peut être critique avec les pinces à vide. Dans ce cas, nous libérons les objets à l'aide d'une pression positive comme le montre la Fig. 11.23.

Les pinces magnétiques sont un autre exemple de pinces sans doigts : elles utilisent soit des aimants permanents, soit des électroaimants. Les électroaimants sont utilisés dans une plus large mesure.

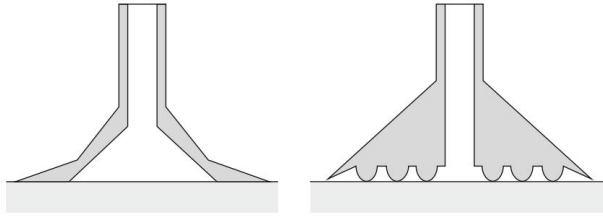


Fig. 11.22 Têtes d'aspiration des préhenseurs à vide

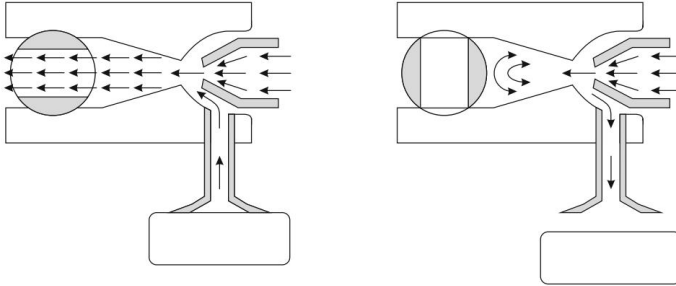


Fig. 11.23 Saisir et relâcher un objet à l'aide d'une pression négative et positive

Avec des aimants permanents, la libération de l'objet présente une difficulté. Le problème est résolu en utilisant une trajectoire spécialement planifiée de l'effecteur final où l'objet est retenu par une clôture dans l'espace de travail du robot. Dans les pinces magnétiques, plusieurs aimants sont utilisés ensemble, placés selon différents motifs correspondant à la forme de l'objet.

Déjà de petites fissures d'air entre l'aimant et l'objet diminuent considérablement la force magnétique. Les surfaces des objets saisis doivent donc être planes et propres.

Les pinces à perforation sont considérées comme des pinces robotiques spéciales. Ici, les objets sont simplement percés par la pince. Ils sont généralement utilisés pour la manipulation de matériaux tels que le textile ou le caoutchouc mousse. De telles pinces ne peuvent être utilisées que dans les cas où la perforation n'endommage pas l'objet. Les nappes de textile peuvent être saisies par de grosses brosses faites de poils raides en nylon ou simplement de bandes velcro.

Des pinces adhésives peuvent être utilisées pour saisir des pièces très légères. La libération des pièces doit être résolue par des trajectoires spéciales de point final du robot où la pièce entre en collision avec la clôture dans l'espace de travail du robot et est ainsi retirée de la pince à adhésif.

Une force d'adhérence suffisante est assurée à l'aide de ruban adhésif qui doit bouger pendant l'opération.

Outre les pinces, le robot peut avoir d'autres outils attachés à son extrémité. La forme et la fonction de l'outil dépendent de la tâche de la cellule robotisée. L'opération la plus fréquente que les robots effectuent est le soudage. À des fins de soudage, plusieurs approches différentes peuvent être utilisées. Parmi eux, l'outil le plus fréquemment attaché au robot

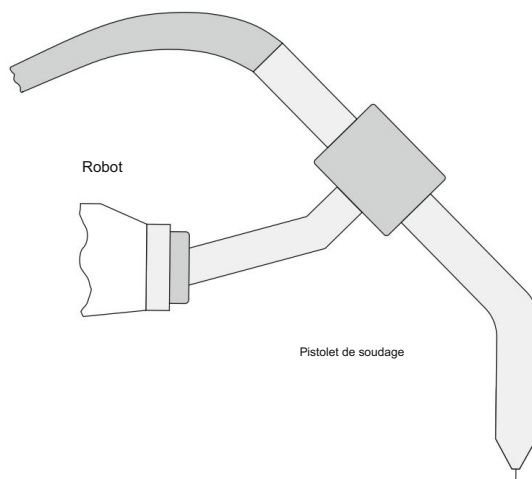


Fig. 11.24 Robot avec pistolet de soudage fixé à son extrémité

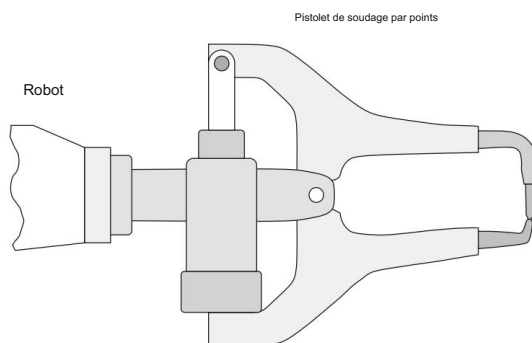


Fig. 11.25 Robot avec pistolet de soudage par points fixé à son extrémité

L'extrémité est un pistolet ou une torche de soudage à l'arc (Fig. 11.24) pour transmettre le courant de soudage d'un câble à l'électrode. La tâche est effectuée dans de nombreux domaines différents de la fabrication. Outre le soudage à l'arc, les pistolets de soudage par points (Fig. 11.25) sont fréquemment utilisés dans les processus de fabrication, principalement dans l'industrie automobile.

Chapitre 12

Robots collaboratifs



En 1942, Isaac Asimov a publié le roman de science-fiction "I, Robot", où les trois lois de la robotique ont été introduites. La première règle stipulait qu'"un robot ne peut pas blesser un être humain ou, par inaction, permettre à un être humain de se blesser".

Jusqu'à présent, les robots industriels ont toujours été des appareils rapides et robustes qui travaillent sur des tâches spécifiques conçues pour eux. Pour rester en conformité avec la règle susmentionnée, ils effectuaient derrière des gardes fixes et verrouillés et des équipements de protection sensibles pour empêcher l'intrusion humaine dans leur espace de travail. Avec l'introduction des robots collaboratifs, les cages sont omises car ces robots sont conçus pour fonctionner avec des humains. Ils sont construits avec différentes caractéristiques de sécurité pour éviter les collisions, mais si une collision se produit, le mécanisme se déplacera dans la direction opposée ou s'arrêtera complètement pour éviter de causer des blessures.

La spécification technique ISO/TS 15066:2016 : Robots et dispositifs robotiques — Robots collaboratifs complète les exigences et les lignes directrices sur le fonctionnement collaboratif des robots industriels fournies dans les normes ISO 10218-1:2011 et ISO 10218-2:2011 (ANSI/RIA R15.06 :2012). Elle spécifie les exigences de sécurité pour les systèmes de robots industriels collaboratifs et l'environnement de travail. Plus précisément, l'ISO/TS 15066:2016 fournit des lignes directrices complètes pour l'évaluation des risques dans les applications robotiques collaboratives.

12.1 Système de robot industriel collaboratif

Un robot collaboratif est un robot qui peut être utilisé dans une opération collaborative, où un système de robot spécialement conçu et un opérateur humain travaillent en coopération directe dans un espace de travail défini. Le terme robot définit le bras du robot et la commande du robot et n'inclut pas l'effecteur ou la pièce du robot. Avec le terme système de robot, nous décrivons un robot, un effecteur et une pièce à usiner.

Pour le système de robot collaboratif, nous pouvons définir différents espaces de travail (Fig. 12.1) :

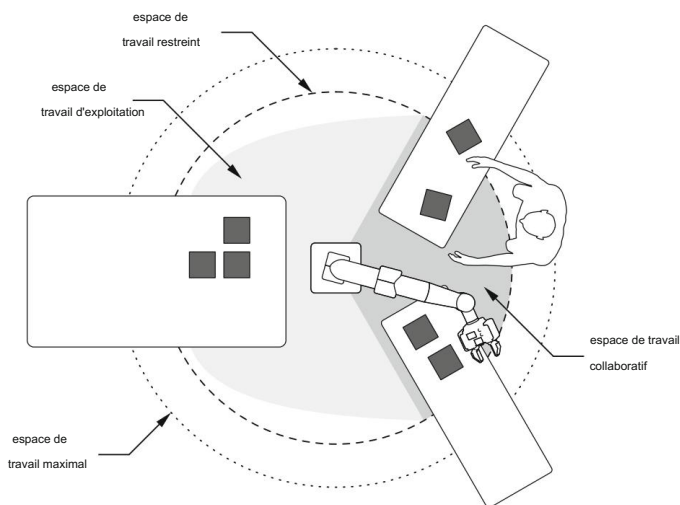


Fig. 12.1 Espace de travail maximal (limité par une ligne pointillée), espace de travail restreint (limité par une ligne pointillée), espace de travail opérationnel (zones grises) et espace de travail collaboratif (zone gris foncé)

- espace de travail maximum : espace pouvant être balayé par les segments mobiles du robot tel que défini par le constructeur plus l'espace pouvant être balayé par l'effecteur et la pièce ;
- espace de travail restreint : portion de l'espace maximal restreinte par des dispositifs de limitation qui établissent des limites qui ne seront pas dépassées ;
- espace de travail d'exploitation : partie de l'espace restreint qui est effectivement utilisée pendant exécuter tous les mouvements commandés par le programme de tâches ;
- espace de travail collaboratif : partie de l'espace d'exploitation où le système robotique et un humain peuvent effectuer des tâches simultanément pendant l'opération de production.

L'espace de travail collaboratif doit être conçu de manière à ce que l'opérateur puisse effectuer toutes les tâches prévues. L'emplacement des machines et des équipements ne doit pas introduire de risques supplémentaires pour la sécurité. Dans l'espace de travail collaboratif, des limitations strictes concernant la vitesse, les limites d'espace et la détection de couple sont appliquées pour garantir la sécurité de l'opérateur. En dehors de l'espace de travail collaboratif, le robot peut agir comme un robot industriel traditionnel sans aucune limitation particulière à l'exception de celles liées aux tâches.

Le terme opérateur inclut tout le personnel qui est en contact avec le système de robot, pas seulement les opérateurs de production. Il comprend le personnel de maintenance, de dépannage, de configuration, de nettoyage et de production.

Les caractéristiques opérationnelles des systèmes de robots collaboratifs sont significativement différentes de celles des systèmes de robots industriels traditionnels présentés dans l'ISO 10218-1:2011 et l'ISO 10218-2:2011. Dans les opérations robotiques collaboratives, les opérateurs peuvent travailler à proximité directe du système de robot pendant que le système est actif, et un contact physique entre un opérateur et le système de robot peut se produire dans l'espace de travail collaboratif. À ce titre, des mesures de protection adéquates doivent être introduites pour

des systèmes robotisés innovants pour assurer la sécurité de l'opérateur à tout moment lors des opérations collaboratives. fonctionnement des robots.

12.2 Robot collaboratif

La conception des robots collaboratifs s'éloigne des robots industriels lourds, raides et rigides vers des dispositifs légers à compliance active et/ou passive.

L'utilisation de métaux légers à haute résistance ou de matériaux composites pour les liaisons de robot contribue à une faible inertie mobile qui affecte davantage la consommation d'énergie de les moteurs. Les manipulateurs en série peuvent être équipés de moteurs haute puissance/couple avec des engrenages à rapport de transmission élevé dans chaque articulation ou des moteurs positionnés à la base tout en la puissance est transmise via des tendons. Si le rapport de transmission est petit, le système est intrinsèquement rétro-conduisible.

L'utilisation d'actionneurs intrinsèquement flexibles permet la conception de dispositifs d'inspiration biologique robots, car les actionneurs imitent les performances des muscles humains/animaux. Le les actionneurs peuvent avoir une impédance mécanique fixe contrôlée via une commande active, telle que comme actionneur élastique série (SEA), ou l'impédance peut être ajustée en changeant paramètres d'un joint mécanique, comme dans l'actionneur à rigidité variable (VSA). L'EES est un combinaison d'un moteur, d'une boîte de vitesses et d'un ressort, où la torsion du ressort est mesurée pour contrôler la sortie de force, tandis que la mesure de la torsion du ressort est utilisée comme capteur de force. VSA peut être utilisé pour rendre le robot plus sûr en cas de collision car la rigidité de l'articulation et l'inertie de l'impact sont réduites. Conceptions conceptuelles de l'EES et Les VSA sont présentées à la Fig. 12.2.

Les robots collaboratifs ont également des géométries spéciales qui minimisent l'énergie de contact transfert en maximisant la zone d'impact. Les robots ont des formes rondes et intégrés caractéristiques qui réduisent le risque de points de pincement et la gravité d'un impact. Principal les caractéristiques du robot collaboratif sont présentées dans la Fig. 12.3

Pour assurer un haut niveau de sécurité, le système de robot doit inclure différents capteurs pour surveiller l'état du robot et de son espace de travail comme présenté au Chap. 7.

Les robots peuvent être équipés de capteurs de couple articulaires, de capteurs de force/couple au niveau de l'effecteur terminal et de différents capteurs tactiles utilisés comme peau douce ou coque dure pour le robot.

Tous ces capteurs permettent au robot de détecter le contact avec l'environnement (opérateur) ou éviter une collision en l'anticipant et en réagissant en conséquence. Certains robots utilisent

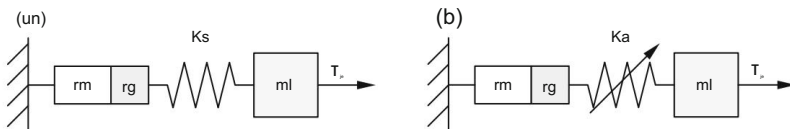


Fig. 12.2 a Actionneur élastique série (SEA), b Actionneur à raideur variable (VSA) ; rm et rg représentent moteur et réducteur, élément conforme K_s à raideur fixe, élément conforme K_a réglable, ml masse du maillon mobile et T_e couple de l'articulation entraînant le mouvement du maillon

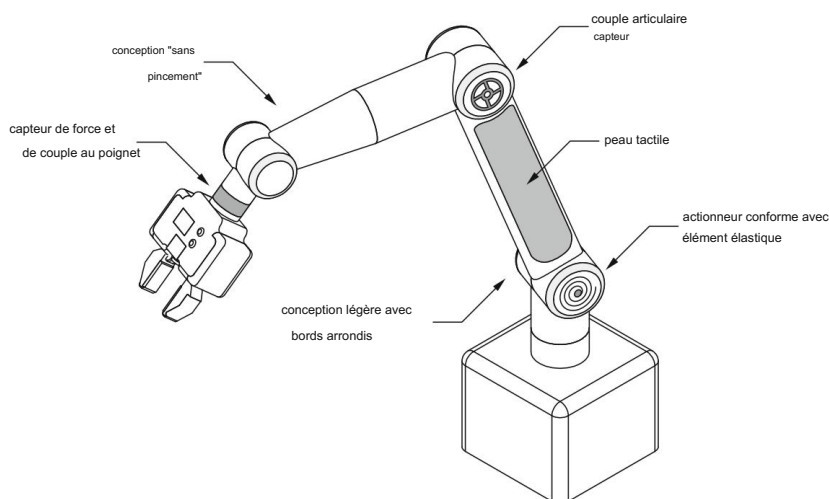


Fig. 12.3 Caractéristiques de conception d'un robot collaboratif

des encodeurs redondants dans chaque articulation pour remplacer les couples d'articulation coûteux ; la force peut être dérivée du courant moteur connu et de la position de l'articulation. Les systèmes de robot peuvent inclure d'autres capteurs de sécurité, par exemple des caméras de sécurité, des scanners laser, des rideaux laser, des tapis de sécurité et d'autres équipements de protection électrosensibles, pour détecter la présence de l'opérateur dans l'environnement du robot. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour une réponse appropriée du robot afin d'éviter le serrage, la compression ou l'écrasement de l'opérateur.

Les capteurs incorporés peuvent être utilisés pour un contrôle sûr du robot. Le paradigme principal est de savoir comment gérer le contact physique entre le mécanisme et l'environnement. L'un des schémas de contrôle les plus populaires est le contrôle d'impédance, qui est basé sur le modèle de robot dynamique (5.56). Le modèle dynamique est utilisé pour évaluer les couples articulaires nécessaires pour un mouvement correct du robot. Si les couples articulaires mesurés s'écartent de ceux évalués, la différence est détectée comme une collision. Lorsqu'une collision a été détectée, la stratégie de réponse appropriée doit être activée pour éviter tout danger potentiel pour l'opérateur. Le robot peut ignorer le contact et suivre la trajectoire de référence, ou le robot peut être arrêté. D'autres possibilités incluent le passage du contrôle de position au contrôle de couple en apesanteur (très grande conformité du robot), le passage au contrôle de couple avec l'utilisation des signaux des couples articulaires pour minimiser l'inertie de la liaison et du moteur (robot même "plus léger"), ou pour utiliser des couples mesurés externes et passer au contrôle d'admission, où le robot et l'objet en collision agissent comme deux aimants faisant face aux mêmes pôles ensemble.

L'objectif des robots collaboratifs est de combiner le meilleur des robots et de l'opérateur humain : la précision, la puissance et l'endurance du robot couplées à l'excellente capacité de l'opérateur humain à résoudre des problèmes imprécis. Comme le robot et les opérateurs collaborent dans le même espace de travail, le contact entre les robots et les humains est autorisé. Si un contact accidentel se produit, ce contact ne devrait pas

entraîner des douleurs ou des blessures. Ainsi, les robots collaboratifs peuvent être utilisés aux côtés des opérateurs et améliorer la productivité des travailleurs. Les robots sont légers et ont un faible encombrement, ils peuvent donc être facilement déplacés dans l'atelier, augmentant ainsi leur polyvalence. La programmation des robots collaboratifs est simple, principalement effectuée à la main, de sorte que l'utilisation du robot est très flexible ; le robot peut être opérationnel sur un nouveau poste de travail en très peu de temps.

12.3 Fonctionnement collaboratif

Le fonctionnement collaboratif ne se définit pas uniquement par l'utilisation du robot, mais est conditionné par la tâche, ce que fait le système robotique et l'espace dans lequel la tâche est exécutée. Quatre techniques principales (une ou une combinaison de plusieurs) peuvent être incluses dans le fonctionnement collaboratif :

- arrêt surveillé de sécurité ;
- guidage manuel ;
- surveillance de la vitesse et de la séparation ;
- limitation de puissance et d'effort.

Avec les quatre techniques, le robot fonctionne en mode automatique. Les principaux détails des quatre méthodes sont présentés dans le tableau 12.1. Des descriptions plus détaillées sont disponibles plus bas.

Tableau 12.1 Types d'opérations collaboratives Vitesse Couples

			Commandes de l'opérateur	Technique
Arrêt surveillé de sécurité	Zéro pendant que l'opérateur est dans l'espace de travail collaboratif	Compensation de gravité et de charge uniquement	Aucun pendant que l'opérateur se trouve dans l'espace de travail collaboratif	Pas de mouvement en présence de l'opérateur
Guidage manuel	Vitesse surveillée de sécurité	Comme par entrée directe de l'opérateur	Arrêt d'urgence, dispositif d'activation, entrée de mouvement	Mouvement uniquement par entrée directe de l'opérateur
Surveillance de la vitesse et de la séparation	Vitesse surveillée de sécurité	Au besoin pour maintenir min. distance de séparation et d'exécuter l'application	Aucun pendant que l'opérateur se trouve dans l'espace de travail collaboratif	Contact empêché entre le système de robot et l'opérateur
Limitation de puissance et de force	Max. vitesse déterminée pour limiter les forces d'impact	Max. couple déterminé pour limiter les efforts statiques	Tel que requis par l'application	Le robot ne peut pas transmettre une force excessive (de par sa conception ou son contrôle)

12.3.1 Arrêt surveillé de sécurité

Dans cette méthode, le système de robot doit être équipé de dispositifs de sécurité qui détectent la présence de l'opérateur à l'intérieur de l'espace de travail collaboratif (par exemple, des barrières immatérielles ou des scanners laser). L'opérateur est autorisé à interagir avec le système de robot dans l'espace de travail collaboratif uniquement lorsque la fonction d'arrêt surveillé de sécurité du robot est active et que le mouvement du robot est arrêté avant que l'opérateur n'entre dans l'espace de travail partagé. Pendant la tâche collaborative, le robot est à l'arrêt avec les moteurs alimentés. Le mouvement du système robotisé ne peut reprendre que lorsque l'opérateur a quitté l'espace de travail collaboratif. S'il n'y a pas d'opérateur dans l'espace de travail collaboratif, le robot peut fonctionner comme un robot industriel classique, par exemple de manière non collaborative.

Les opérations de l'arrêt surveillé de sécurité sont présentées dans le tableau 12.2. Lorsque l'opérateur se trouve en dehors de l'espace de travail collaboratif, le robot peut fonctionner sans aucune limitation. Mais dans le cas où le robot est présent dans l'espace de travail en même temps que l'opérateur, l'arrêt surveillé de sécurité du robot doit être actif. Sinon, le robot doit engager un arrêt de protection de catégorie 0 (arrêt incontrôlé du robot en coupant immédiatement l'alimentation des actionneurs) en cas de défaut (CEI 60204-1).

Cette méthode peut être appliquée aux applications de chargement ou de déchargement manuel de l'effecteur terminal, aux inspections de travaux en cours et aux applications où un seul se déplace dans l'espace de travail collaboratif (par exemple, un robot ou un opérateur). Les arrêts surveillés de sécurité peuvent également être intégrés à d'autres techniques collaboratives.

12.3.2 Guidage manuel

Pour le guidage manuel, le robot doit être équipé d'un dispositif de guidage spécial situé au niveau ou à proximité de l'effecteur du robot qui sert à transmettre les commandes de mouvement au système de robot. Le dispositif doit incorporer un arrêt d'urgence et un dispositif d'activation à moins que le système de robot ne réponde à des mesures de conception intrinsèquement sûres ou à des fonctions de limitation de sécurité. L'emplacement du dispositif de guidage doit permettre à l'opérateur de

Tableau 12.2 Actions du robot pour l'arrêt surveillé de sécurité

		Proximité de l'opérateur avec l'espace de travail collaboratif	
		Dehors	À l'intérieur
La proximité du robot avec le collaboratif espace de travail	Dehors	Continuer	Continuer
	À l'intérieur et en mouvement	Continuer	Butée de protection
	À l'intérieur, arrêt surveillé de sécurité	Continuer	Continuer

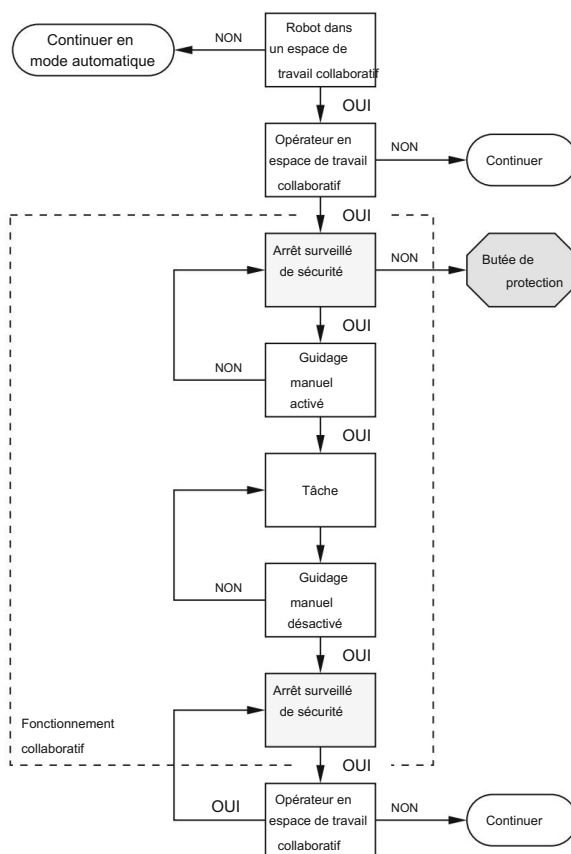


Fig. 12.4 La séquence de fonctionnement pour le guidage manuel

observer directement le mouvement du robot et éviter toute situation dangereuse (par exemple, l'opérateur se tient debout sous une lourde charge). Le contrôle du robot et de l'effecteur doit être intuitivement compréhensible et contrôlable.

Le système de robot est prêt pour le guidage manuel lorsqu'il entre dans l'espace de travail collaboratif et émet un arrêt surveillé de sécurité. À ce stade, l'opérateur peut entrer dans l'espace de travail collaboratif et prendre le contrôle du système de robot avec le dispositif de guidage manuel. Si l'opérateur entre dans l'espace de travail collaboratif avant que le système ne soit prêt pour le guidage manuel, un arrêt de protection doit être émis. Une fois l'arrêt surveillé de sécurité effacé, l'opérateur peut effectuer la tâche de guidage manuel.

Lorsque l'opérateur relâche le dispositif de guidage, l'arrêt surveillé de sécurité est émis. Le fonctionnement non collaboratif reprend lorsque l'opérateur quitte l'espace de travail collaboratif. La séquence de fonctionnement pour le guidage manuel est présentée dans la Fig. 12.4.

Cette technique de collaboration est adaptée à la mise en œuvre dans des applications où le système robotique agit comme un amplificateur de puissance, dans des applications très variables,

où le système de robot est utilisé comme outil, et dans les applications où la coordination des étapes manuelles et partiellement automatisées est nécessaire. La collaboration de guidage manuel peut être mise en œuvre avec succès dans des productions limitées ou en petits lots.

12.3.3 Surveillance de la vitesse et de la séparation

Dans ce procédé, l'opérateur et le système de robot peuvent se déplacer simultanément dans l'espace de travail collaboratif. Pendant les opérations conjointes, la distance de séparation de protection minimale entre l'opérateur et le système de robot est maintenue à tout moment. La distance de séparation de protection est la distance autorisée la plus courte entre toute partie mobile dangereuse du système de robot et l'opérateur dans l'espace de travail collaboratif.

La distance de séparation de protection Sp à l'instant t_0 peut être décrite par (12.1) :

$$Sp(t_0) = Sh + Sr + Ss + C + Zd + Zr, \quad (12.1)$$

où Sh est la contribution à la distance de séparation de protection attribuée au changement d'emplacement de l'exploitant. La formule prend en compte la distance de freinage Sr , qui est la distance due au temps de réaction du robot, et Ss décrivant la distance due à la distance d'arrêt du système robot. C présente la distance d'intrusion, qui est la distance à laquelle une partie du corps peut pénétrer dans le champ de détection avant d'être détectée. La distance de séparation de protection Sp comprend également l'incertitude de position de l'opérateur Zd , résultant de la tolérance de mesure de détection, et l'incertitude de position du système de robot Zr , résultant de la précision du système de mesure de position du robot. Les vitesses maximales admissibles et les distances minimales de séparation de protection dans une application peuvent être variables ou constantes. Les différentes contributions à la distance de séparation de protection sont illustrées à la Fig. 12.5.

Le robot doit être équipé d'une fonction de vitesse surveillée de sécurité et d'un arrêt surveillé de sécurité. Le système de robot comprend également un périphérique de sécurité supplémentaire pour la surveillance humaine (par exemple, des systèmes de caméra de sécurité). Le système de robot peut maintenir une distance de séparation de protection minimale en réduisant la vitesse, qui peut être suivie d'un arrêt surveillé de sécurité ou de l'exécution d'un chemin alternatif qui ne viole pas la distance de séparation de protection, comme présenté à la Fig. 12.6. Si la distance de séparation réelle entre le système de robot et l'opérateur tombe en dessous de la distance de séparation de protection, le système de robot doit déclencher un arrêt de protection et lancer des fonctions liées à la sécurité connectées au système de robot (par exemple, éteindre tous les outils dangereux). Lorsque l'opérateur s'éloigne du robot, la distance de séparation réelle atteint et dépasse la distance de séparation de protection ; à ce stade, le robot peut reprendre le mouvement automatiquement.

La surveillance de la vitesse et de la séparation est utile dans les applications où le système de robot et les tâches de l'opérateur s'exécutent simultanément.

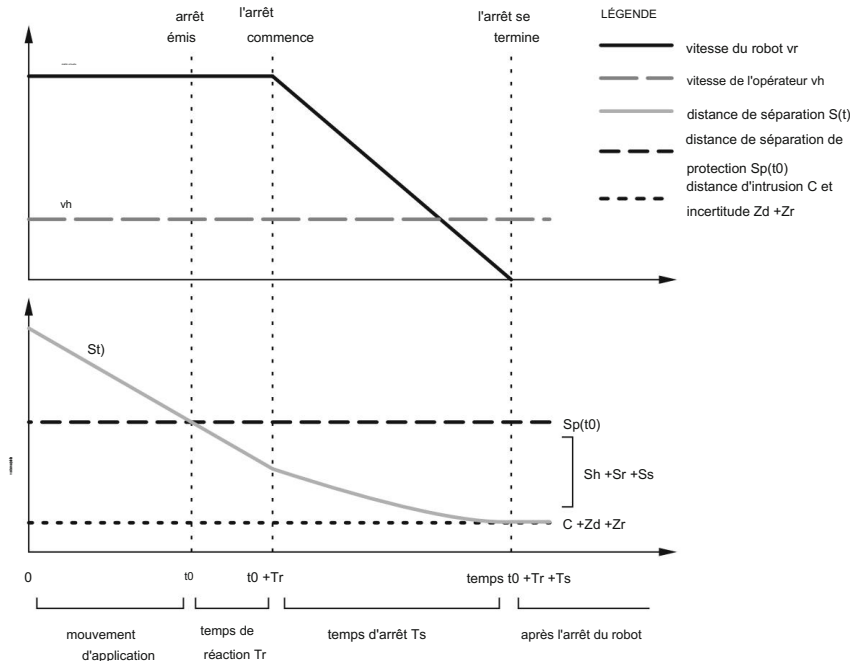


Fig. 12.5 Représentation graphique des contributions à la distance de séparation de protection entre un opérateur et un robot

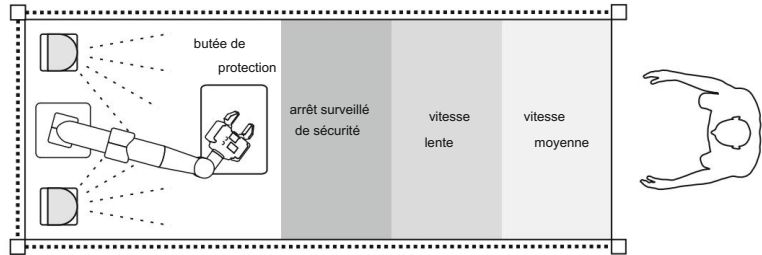


Fig. 12.6 Niveaux de sécurité pour le maintien d'une distance de séparation de protection minimale

12.3.4 Limitation de puissance et de force

La méthode de limitation de puissance et de force permet un contact physique entre le système de robot et l'opérateur, qui peut se produire intentionnellement ou non. La méthode exige que les robots soient spécifiquement conçus au moyen d'une faible inertie, d'une géométrie appropriée (bords et coins arrondis, surfaces lisses et conformes), de matériaux (rembourrage, rembourrage, composants déformables) et de fonctions de contrôle. Le premier comprend des méthodes de conception de sécurité active, telles que la limitation des forces et des couples,

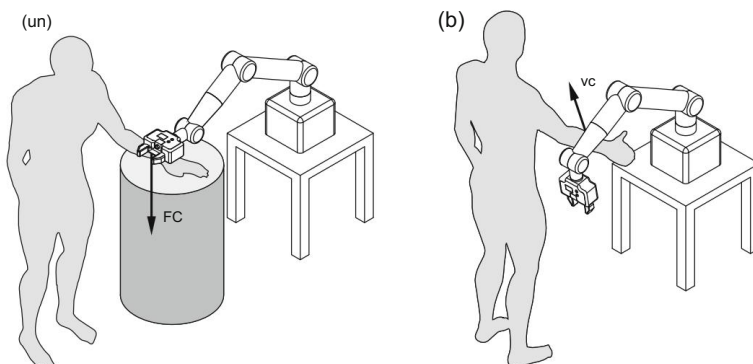


Fig. 12.7 a Contact quasi-statique et b transitoire

limiter les vitesses des pièces mobiles, limiter la quantité de mouvement en limitant les masses en mouvement, et limiter la puissance ou l'énergie mécanique en fonction des masses et des vitesses. La conception du robot peut également inclure l'utilisation d'axes souples de sécurité, de fonctions de limitation d'espace et de fonctions d'arrêt surveillé de sécurité. Certains robots incluent également la détection pour anticiper ou détecter le contact.

Le contact entre le robot collaboratif et les parties du corps de l'opérateur peut être :

- destiné à faire partie de la séquence d'application ; • accessoire en raison du non-respect de la procédure de travail, mais sans défaillance technique ;
- un mode de défaillance qui conduit à des situations de contact.

Il existe deux types de contact possibles entre la partie mobile du système de robot et les zones du corps de l'opérateur. Le contact quasi-statique (Fig. 12.7a) comprend une situation de serrage ou d'écrasement dans laquelle la partie du corps de l'opérateur est coincée entre une partie mobile du système robotisé et une autre partie fixe ou mobile de la cellule de travail. Dans cette situation, la pression ou la force F_c du système de robot est appliquée pendant une période de temps prolongée jusqu'à ce que les conditions soient atténuées. Le contact transitoire (c'est-à-dire l'impact dynamique, Fig. 12.7b) décrit le contact entre la partie mobile du système robotique et la partie du corps de l'opérateur sans pincement ni piégeage de cette partie.

Le contact réel est plus court que le contact quasi-statique susmentionné (<50 ms) et dépend de l'inertie du robot, de l'inertie de la partie du corps de l'opérateur et de la vitesse relative v_c des deux.

Le système de robot doit être conçu de manière adéquate pour réduire les risques pour un opérateur en ne dépassant pas les valeurs limites de seuil applicables de force et de pression pour un contact quasi statique et transitoire. Les limites peuvent s'appliquer aux forces, aux couples, aux vitesses, à la quantité de mouvement, à la puissance mécanique, aux amplitudes de mouvement des articulations ou aux amplitudes spatiales. La valeur limite de seuil pour l'événement de contact pertinent sur la région corporelle exposée est déterminée pour un scénario du pire des cas pour les deux types de contact.

Les valeurs limites présentées dans l'ISO/TS 15066:2016 sont basées sur une estimation prudente et des recherches scientifiques sur les sensations de douleur. Quelques valeurs informatives pour

Tableau 12.3 Limites biomécaniques pour le contact quasi-statique

Zone du corps	Maximum autorisé pression pQS/N/cm2	Maximum autorisé force FQS/N
Septième muscle du cou	210	150
Articulation de l'épaule	160	210
Sternum	120	140
Abdomen	140	110
Bassin	210	180
Humérus	220	150
Avant bras	180	160
Palmier	260	140
Coussinet d'index	300	140
Articulation de l'index	280	140
Le dos de la main	200	140
Cuisse	250	220
Rotule	220	220
Tibia	220	130
Veau	210	130

la pression maximale admissible et la force maximale admissible entre le robot la partie et la région du corps de l'opérateur en contact quasi-statique sont présentées dans le tableau 12.3. Les valeurs de pression et de force pour un contact transitoire (pT , FT) peuvent être au moins deux fois valeurs pour contact quasi-statique (pQS, FQS).

$$pT = 2 \cdot pQS \text{ FT} \tag{12.2}$$

$$= 2 \cdot FQS . \tag{12.3}$$

Le contact avec le visage, le crâne ou le front n'est pas autorisé et doit être évité.

Pour des réactions appropriées du système de robot, les limites de pression et de force doivent être respectées en considération, selon la situation. En cas de serrage du corps de l'opérateur partie (par exemple, la main de l'opérateur), la force résultante peut être bien inférieure au seuil limite la limite de pression sera donc le facteur limitant. En revanche, si le contact se situe entre deux zones assez larges et molles (par exemple, la partie rembourrée du robot et la partie de l'opérateur abdomen), la pression résultante sera inférieure au seuil limite et la limite sera alors la limite de force.

En cas de contact, le système de robot doit réagir de manière à ce que l'effet du le contact identifié reste en dessous des valeurs seuils identifiées, telles que présentées sur la figure 12.8. En cas de serrage ou de goupillage d'une partie du corps entre un segment de robot et un autre objet, le robot doit limiter la vitesse pour se conformer aux mesures de protection limites. Le robot doit également disposer d'une option intégrée permettant à l'opérateur de extraire la zone du corps touchée.

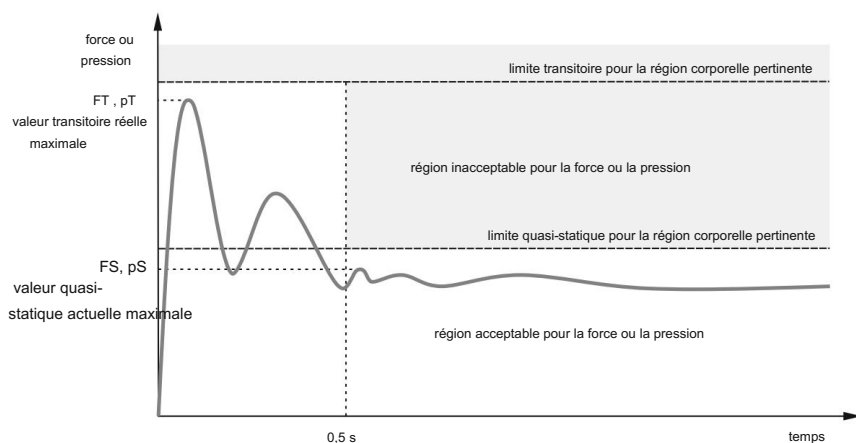


Fig. 12.8 Représentation graphique des forces ou pressions acceptables et inacceptables en cas de contact quasi-statique ou transitoire

La méthode de limitation de puissance et de force peut être utilisée dans une application collaborative où la présence de l'opérateur est fréquemment nécessaire, dans des opérations dépendant du temps (où le retard dû aux arrêts de sécurité n'est pas souhaité mais un contact physique entre le système de robot et l'opérateur peut se produire), et les applications avec de petites pièces et une grande variabilité d'assemblage.

12.4 Préhenseurs robots collaboratifs

La conception et le contrôle d'un robot collaboratif permettent au robot d'être en sécurité tout en travaillant avec l'opérateur. Mais le robot lui-même n'est qu'une partie du système robotique. Les préhenseurs représentent une partie importante du système robotique car ils sont utilisés pour la manipulation d'objets à proximité directe de l'opérateur. En tant que tels, les préhenseurs doivent atteindre un haut niveau de sécurité.

Les préhenseurs sont généralement fixés de manière rigide au robot déjà sécurisé avec des limitations de vitesse et de force intégrées. La forme et les matériaux de la pince doivent coïncider avec la conception de sécurité empêchant le dépassement des limites de pression sur la zone de contact du corps de l'opérateur. De plus, les pinces à l'extrémité du robot doivent créer le moins d'inertie possible pour interférer le moins possible avec les fonctions de sécurité du robot.

La conception des pinces doit empêcher l'opérateur de se coincer les doigts dans la pince ou dans les câbles de raccordement. Les préhenseurs doivent avoir implémenté un mode sans échec sous un arrêt d'urgence, dont la fonction dépend de l'application.

S'il y a une pièce saisie, l'opérateur souhaite généralement que la pièce reste saisie en toute sécurité. Lors de l'apprentissage et de la fermeture du préhenseur, l'opérateur souhaite que le préhenseur arrête d'appliquer la force.

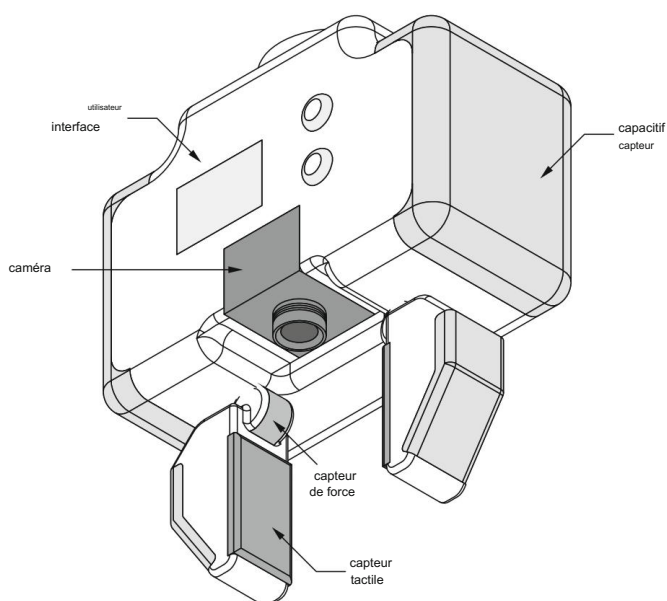


Fig. 12.9 Conception conceptuelle d'un préhenseur pour la préhension collaborative

Lorsque le préhenseur interagit avec la pièce, l'opérateur veut une bonne prise solide.

La poignée doit également être sécurisée en cas d'arrêt d'urgence ou de perte de puissance, car une pièce qui tombe pourrait représenter un danger pour un opérateur, un robot ou l'environnement. Si le robot se déplace rapidement, la pièce qui tombe peut devenir un projectile.

Les pinces peuvent être équipées de différents capteurs pour augmenter la sécurité de l'opérateur (Fig. 12.9). Les capteurs capacitifs sont utilisés pour la détection précoce de l'opérateur et ainsi la prévention des contacts indésirables. Les systèmes de caméra peuvent détecter l'environnement du robot et faciliter la recherche d'objets. Des capteurs tactiles sont utilisés pour différencier la pièce et l'opérateur. Pour régler une force de préhension adéquate, différents capteurs de force peuvent être intégrés.

La conception de la pince peut également inclure différentes interfaces utilisateur, telles qu'un écran LCD, des voyants lumineux et des boutons de commande.

Les préhenseurs utilisés dans les systèmes de robots collaboratifs doivent être faciles à installer et à programmer. La conception future des préhenseurs tend à s'éloigner de la programmation utilisateur vers des préhenseurs qui pourront s'adapter automatiquement en fonction des pièces et des applications.

12.5 Applications du système robotique collaboratif

Le document ISO 10218-2:2011 fournit la division des applications collaboratives en cinq catégories présentées dans la Fig. 12.10.

L'application de la fenêtre de transfert (voir Fig. 12.10a) couvre les tâches de chargement/déchargement, de test, de mise au banc, de nettoyage et d'entretien. Le robot est positionné derrière des éléments fixes ou

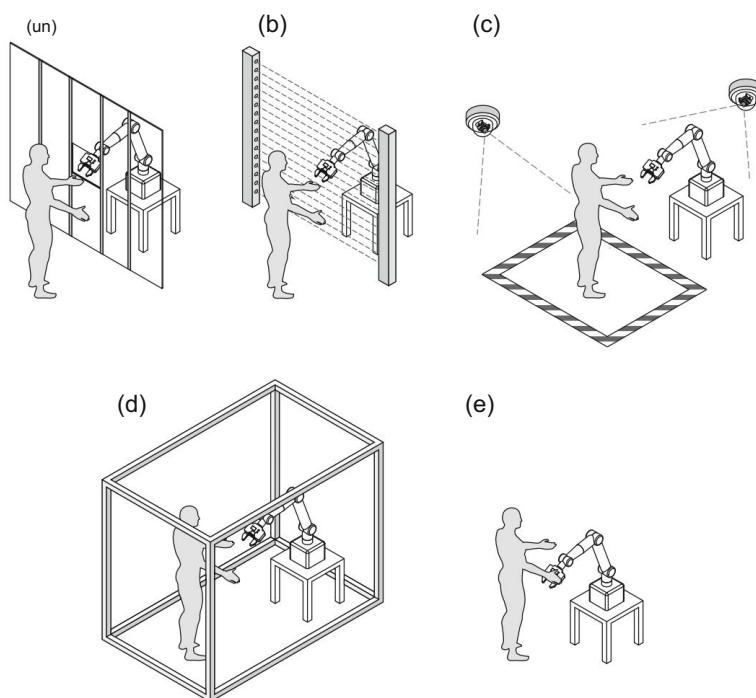


Fig. 12.10 Applications conceptuelles des robots collaboratifs : a fenêtre de transfert, b fenêtre d'interface, c espace de travail collaboratif, d inspection et e robot guidé à la main (ISO 10218-2:2011)

des gardes sensibles autour de l'espace de travail où l'application est effectuée en mode automatique sans limitations. L'interaction avec l'opérateur s'effectue via un fenêtre. A proximité de la fenêtre, le robot réduit sa vitesse. La fenêtre aussi agit comme la limite de l'espace de travail du robot.

La fenêtre d'interface (Fig. 12.10b) agit comme une barrière pour le système de robot. Sur le côté robot le robot peut effectuer des opérations automatiques autonomes. Le système robotisé est également gardé par des gardes fixes ou sensibles autour de l'espace de travail. Le robot s'arrête dans la fenêtre d'interface et peut ensuite être manuellement déplacé en dehors de l'interface. Pour mouvement guidé le robot doit être équipé d'un dispositif de guidage manuel. Cette méthode est utilisé pour l'empilage automatique, l'assemblage guidé, le remplissage guidé, les tests, la mise au banc, et nettoyage.

Les applications comprenant un assemblage et une manipulation simples peuvent tirer parti de l'espace de travail collaboratif (Fig. 12.10c). A l'intérieur de l'espace de travail commun, le robot peut effectuer des opérations automatiques. Lorsque l'opérateur entre dans l'espace de travail collaboratif, le robot ralentit et/ou s'arrête. Dans ce type d'application, des systèmes de détection de personnes supplémentaires utilisant un ou plusieurs capteurs sont nécessaires.

Les applications comprenant l'inspection et le réglage des paramètres (par exemple, l'application de soudage, voir Fig. 12.10d) nécessitent un espace de travail protégé et des systèmes de détection de personnes.

Lorsque l'opérateur entre dans l'espace de travail partagé, le robot continue à fonctionner avec vitesse réduite. L'application doit disposer de mesures supplémentaires pour éviter les abus.

Les robots guidés à la main (Fig. 12.10e) sont utilisés pour les applications guidées à la main (par exemple, montage ou peinture). Le robot est équipé d'un dispositif de guidage manuel. L'opérateur guide le robot à la main le long d'un chemin dans un espace de travail spécifique à la tâche avec un vitesse. Le domaine de l'espace de travail collaboratif est principalement dépendant des aléas de l'application requise.

Chapitre 13

Robots mobiles



Un robot mobile est un appareil capable de se déplacer. Il a la capacité de se déplacer dans son environnement à l'aide de roues, de chenilles, de pattes ou d'une combinaison de ceux-ci. Il peut aussi voler, nager, ramper ou rouler. Les robots mobiles sont utilisés pour diverses applications dans les usines (véhicules guidés automatisés), les maisons (appareils de nettoyage des sols), les hôpitaux (transport de nourriture et de médicaments), dans l'agriculture (cueillette de fruits et légumes, fertilisation, plantation), pour l'armée ainsi que pour la recherche et les opérations de sauvetage. Ils répondent à la demande de manutention flexible des matériaux, au souhait que les robots puissent opérer sur de grandes structures et au besoin de reconfiguration rapide des zones de travail.

Bien que les robots mobiles se déplacent de différentes manières, l'accent sera mis dans ce chapitre sur les appareils qui utilisent des roues pour se déplacer (les robots marcheurs sont présentés au chapitre 14). Dans les applications industrielles, les véhicules à guidage automatique (AGV) présentent un intérêt particulier pour déplacer des matériaux dans une usine de fabrication ou un entrepôt. Les remorqueurs tirent généralement des chariots (Fig. 13.1a), les chargeurs d'unités utilisent une plate-forme plate pour transporter une unité de charge empilée sur la plate-forme (Fig. 13.1b) et les chariots élévateurs mobiles sont utilisés pour ramasser et déposer automatiquement les charges à différentes hauteurs (Fig. 13.1c). Les AGV suivent généralement des marqueurs ou des fils dans le sol, ou utilisent la vision, des aimants ou des lasers pour se déplacer dans l'installation. Ce mouvement organisé s'appelle la navigation ; un processus ou une activité pour planifier et diriger un robot le long d'un itinéraire ou d'un chemin pour se déplacer en toute sécurité d'un endroit à un autre sans se perdre ou entrer en collision avec d'autres objets.

La navigation est généralement une tâche complexe consistant en la localisation, la planification de trajectoire et le contrôle de mouvement. La localisation indique la capacité du robot à établir sa propre position et orientation dans le cadre de coordonnées global. La planification de trajectoire autonome représente la détermination d'une trajectoire sans collision pour un robot entre les positions de départ et d'arrivée entre les obstacles encombrés dans un espace de travail. Cela inclut également les interactions entre les robots mobiles et les humains et entre les groupes de robots mobiles. Le contrôle de mouvement doit garantir l'exécution du mouvement le long de la trajectoire prévue avec l'évitement simultané d'obstacles.

Dans les environnements collaboratifs, les humains et les robots partagent un espace de travail, ce qui nécessite une meilleure communication homme-robot et une sensibilisation du robot aux personnes qui l'entourent. Le robot doit généralement se tenir à une distance de sécurité des personnes. Cependant, des appareils comme

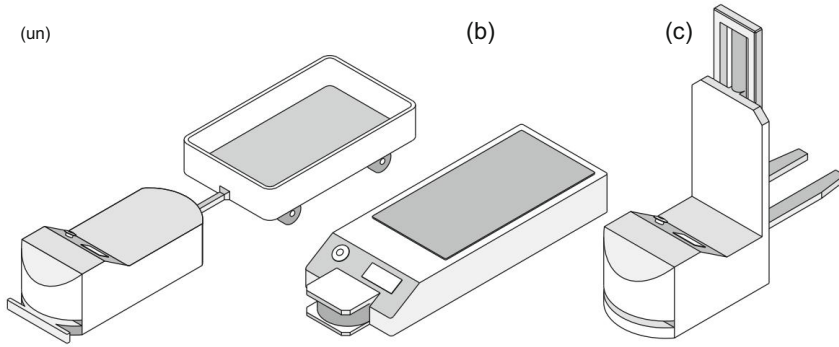


Fig. 13.1 Véhicules guidés automatisés : a Tracteur, b chargeur d'unité et c chariot élévateur mobile

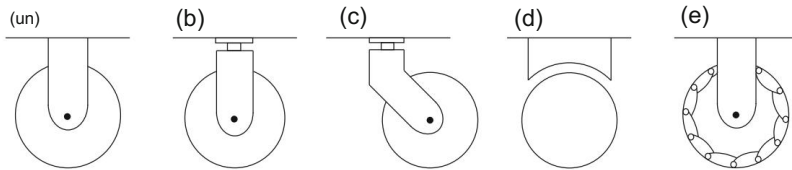


Fig. 13.2 Types de roues : a roue fixe standard, b roue directrice standard, c roue pivotante, d roue sphérique et e roue suédoise

robots de soins personnels, nécessitent une proximité étroite entre l'homme et le robot et ces machines sont des exemples de systèmes interactifs homme-robot avancés.

13.1 Cinématique du robot mobile

De par sa conception mécanique simple, la roue est le mécanisme de locomotion le plus répandu en robotique mobile. Les roues assurent la traction et trois roues garantissent la stabilité équilibre des robots. Les roues peuvent être conçues sous différentes formes, comme illustré à la Fig. 13.2.

La roue fixe, la roue directrice standard et la roue pivotante ont un primaire axe de rotation et sont directionnels. Le mouvement dans une direction différente n'est pas possible sans braquer au préalable le volant autour de l'axe vertical. La roue sphérique est omnidirectionnel car il permet un mouvement dans toutes les directions sans direction préalable. Le La roue suédoise tente d'obtenir un comportement omnidirectionnel avec des rouleaux passifs attachés autour de la circonférence de la roue. Ainsi, la roue peut se déplacer le long de différents trajectoires, ainsi que vers l'avant et vers l'arrière.

Sélection du type de roue, du nombre de roues, ainsi que de leur fixation au robot châssis affectent de manière significative la cinématique du robot mobile. Exemples de conceptions cinématiques sont illustrés à la Fig. 13.3. Ils vont des configurations à deux roues à quatre roues.

Les deux plates-formes de la colonne de droite sont omnidirectionnelles.

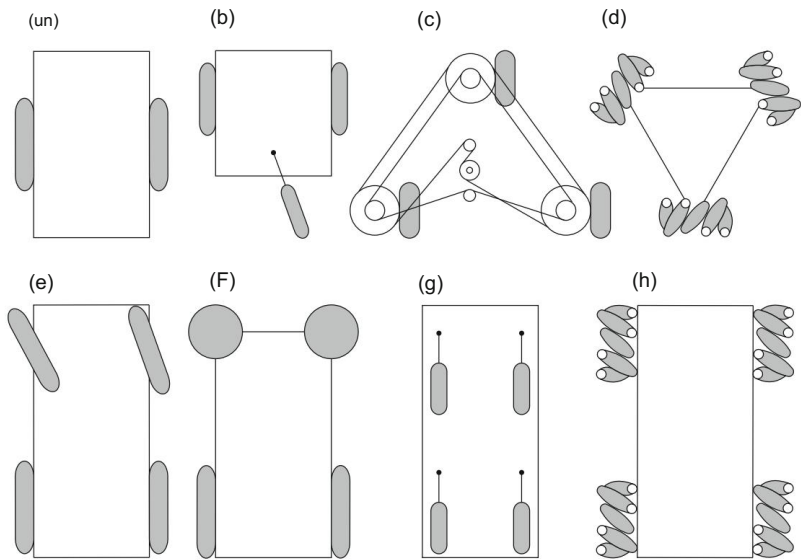


Fig. 13.3 Exemples de configuration de robot mobile : a transmission différentielle à deux roues, b transmission différentielle avec roue pivotante, c trois roues motrices et directrices synchrones, d trois roues omnidirectionnelles roues en triangle, e quatre roues avec direction de type automobile, f deux roues à traction différentielle et deux roues omnidirectionnelles, g quatre roues pivotantes motorisées et dirigées, et h quatre roues omnidirectionnelles roues en configuration rectangulaire

Pour les besoins de l'analyse, un robot mobile sera représenté comme un corps rigide sur roues qui ne peuvent se déplacer que dans un plan horizontal. Avec ces hypothèses, la pose du robot peut être défini avec trois coordonnées, deux représentant la position dans le plan horizontal et un décrivant l'orientation autour de l'axe vertical. Rapports sont présentés à la Fig. 13.4 pour un mécanisme d'entraînement différentiel simple. Axes xG et yG définir le cadre de coordonnées global. Le cadre de coordonnées local du robot est défini avec axes xm et ym. L'axe xm pointe dans la direction avant du robot.

La position et l'orientation du robot sont définies avec le vecteur suivant

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{13.1}$$

où les coordonnées x et y définissent la position du robot par rapport à la coordonnée globale le cadre et l'angle θ déterminent son orientation (rotation autour de l'axe vertical). Robot l'orientation peut également être décrite sous la forme d'une matrice de rotation

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.2}$$

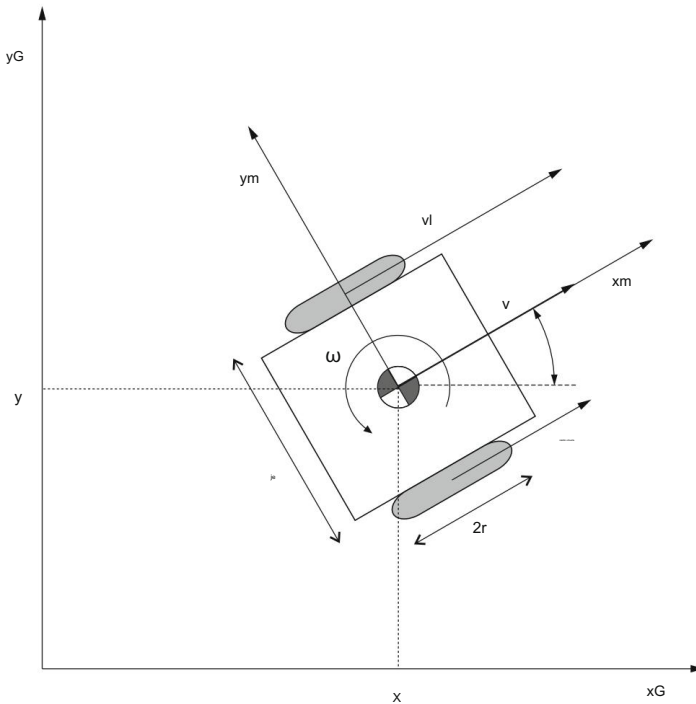


Fig. 13.4 Position et orientation d'un robot mobile - exemple de robot à entraînement différentiel

Une matrice de transformation homogène décrivant la pose du robot mobile est alors

$$T = \begin{pmatrix} \cos & -\sin & 0 & x \\ \sin & \cos & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13.3)$$

Le robot à entraînement différentiel présenté à la Fig. 13.4 a une structure mécanique simple. Son mouvement repose sur deux roues entraînées séparément fixées de part et d'autre du corps du robot. Le robot change de direction en faisant varier la vitesse relative de rotation de ses roues. Ainsi, il ne nécessite pas de mouvement de direction supplémentaire. Si les roues sont entraînées dans le même sens et à vitesse égale, le robot suivra une ligne droite. Si les roues sont tournées à vitesse égale dans des directions opposées, le robot tournera autour du point médian entre les roues. En général, le centre de rotation du robot peut se situer n'importe où sur la ligne passant par les axes des roues et dépendra de la vitesse de rotation de chaque roue et de sa direction.

Avec sa cinématique simple, c'est un modèle idéal pour étudier le mouvement des robots. En représentant la largeur du robot (distance entre les points de contact des pneus avec le sol) avec l et le rayon de la roue avec r , le mouvement du robot peut être analysé. Les roues tournent avec

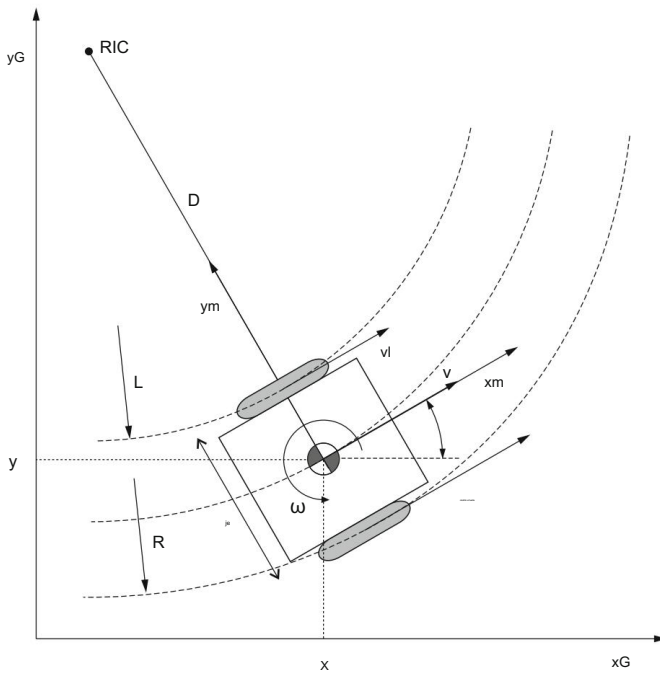


Fig. 13.5 Cinématique du robot à entraînement différentiel

vitesse angulaire ω_r (roue droite) et ω_l (roue gauche), résultant en des vitesses de roue v_r et v_l de la roue droite et gauche, respectivement

$$\begin{aligned} v_r &= \omega_r r, \\ v_l &= \omega_l r. \end{aligned} \quad (13.4)$$

Les deux rotations de roue entraînent la vitesse de translation du robot le long de l'axe x_m du robot et la vitesse angulaire autour de son axe vertical. En référence à la Fig. 13.5, la vitesse angulaire peut être définie comme

$$\omega = \frac{v_l}{D} = \frac{v_r - v_l}{J + \frac{r}{2}}, \quad (13.5)$$

où D est la distance entre le point médian du robot (dans ce cas l'origine du repère x_m-y_m) et le point qui définit le centre instantané de rotation (ICR). L'ICR est le point dans le plan horizontal autour duquel le robot tourne à un instant précis. De l'égalité dans (13.5) la relation suivante peut être dérivée

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{r} = \frac{r}{J} (\omega_r - \omega_l). \quad (13.6)$$

La vitesse de translation le long de l'axe x_m peut alors être déterminée comme

$$v = \omega D = 2 \frac{vr + vl}{2} = \frac{r}{2} (\omega r + \omega l). \quad (13.7)$$

Les équations (13.6) et (13.7) définissent les relations entre les vitesses angulaires des roues et la vitesse du robot mobile. Cependant, du point de vue du contrôle, c'est la relation inverse la plus pertinente qui définit les vitesses angulaires des roues à partir de la vitesse souhaitée du robot. En combinant (13.6) et (13.7) on obtient les relations suivantes

$$\begin{aligned} \omega r &= \frac{2v + \omega l}{2r}, \\ \omega l &= \frac{2v - \omega r}{2r}. \end{aligned} \quad (13.8)$$

La vitesse du robot déterminée comme une paire $[v, \omega]$ est définie par rapport au cadre de coordonnées local du robot mobile $x_m - y_m$. La vitesse du robot dans le cadre de coordonnées globales $x_G - y_G$ défini comme la dérivée temporelle du vecteur de pose du robot x (13.1) peut être calculée en faisant tourner la vitesse exprimée localement à l'aide de la matrice de rotation R (13.2) comme

$$\begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \\ v \sin \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13.9)$$

En combinant les parties de translation et de rotation des équations ci-dessus et en omettant les éléments qui sont nuls, la vitesse du robot mobile dans le cadre de coordonnées global peut être écrite comme

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \\ v \sin \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13.10)$$

De l'éq. (13.10) il est clair que les grandeurs pertinentes pour décrire le mouvement du robot mobile sont la vitesse de translation le long de l'axe v du robot x_m , la vitesse de rotation autour de l'axe vertical ω et l'orientation du robot par rapport au référentiel global. Dans cet esprit, nous pouvons simplifier davantage le robot à entraînement différentiel en un modèle de monocycle (comme illustré à la Fig. 13.6). Maintenant, les trois quantités mentionnées ci-dessus décrivent le mouvement du monocycle représenté comme une seule roue avec une direction vers l'avant marquée au milieu du robot à entraînement différentiel sur la Fig. 13.6. Le monocycle peut être facilement transformé en robot à entraînement différentiel basé sur l'équation. (13.8).

La propriété attrayante du modèle de monocycle est sa simplicité. Par conséquent, il sera utilisé tout au long de ce chapitre pour l'analyse. Cependant, le modèle peut en général être reconverti en tout autre robot mobile cinématiquement plus complexe. À titre d'exemple, nous examinons une plate-forme mobile basée sur le principe de direction de voiture illustré à la Fig. 13.7.

La géométrie de la direction de la voiture résout le problème des roues à l'intérieur et à l'extérieur d'un virage nécessitant de tracer des cercles de rayons différents. Par conséquent, les angles de braquage des roues avant gauche et droite sont différents. Dans le modèle de monocycle, l'orientation du monocycle est définie avec un angle, identique à l'orientation du robot à entraînement différentiel.

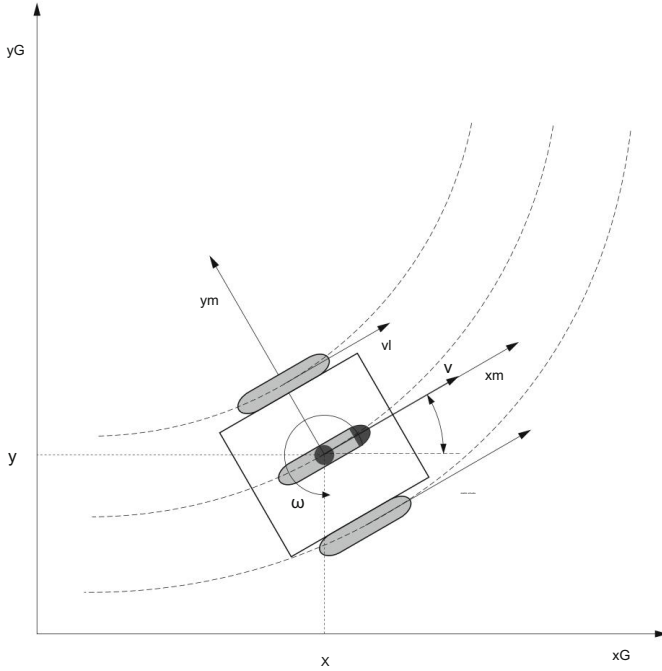


Fig. 13.6 Modèle de monocycle d'un robot mobile à entraînement différentiel

Dans le problème de type voiture, l'orientation du robot mobile est définie par l'angle ψ . Le modèle de monocycle est positionné au milieu des roues avant et son orientation est définie de manière à obtenir le même centre de rotation instantané tel que défini par l'orientation des roues gauche et droite de la voiture. Le monocycle est maintenant la troisième roue avant et l'ICR est positionné au point d'intersection des trois lignes perpendiculaires aux roues avant. L'angle ψ est maintenant défini comme la déviation de l'orientation du monocycle par rapport à l'axe x_m du robot (comme illustré à la Fig. 13.7). En calculant l'angle ψ , la relation entre le robot en forme de voiture et le monocycle sera établie.

En suivant le même principe qu'en (13.7), la vitesse de translation du monocycle peut être défini comme

$$v = D\omega, \quad (13.11)$$

où D est la distance entre le monocycle et l'ICR. La distance D peut alors être calculée comme

$$r_e = \frac{v}{\omega}. \quad (13.12)$$

La courbure de la trajectoire du monocycle K_u peut être définie comme l'inverse du rayon de rotation instantané tel que

$$K_u = \frac{1}{D} = \frac{\omega}{v}. \quad (13.13)$$

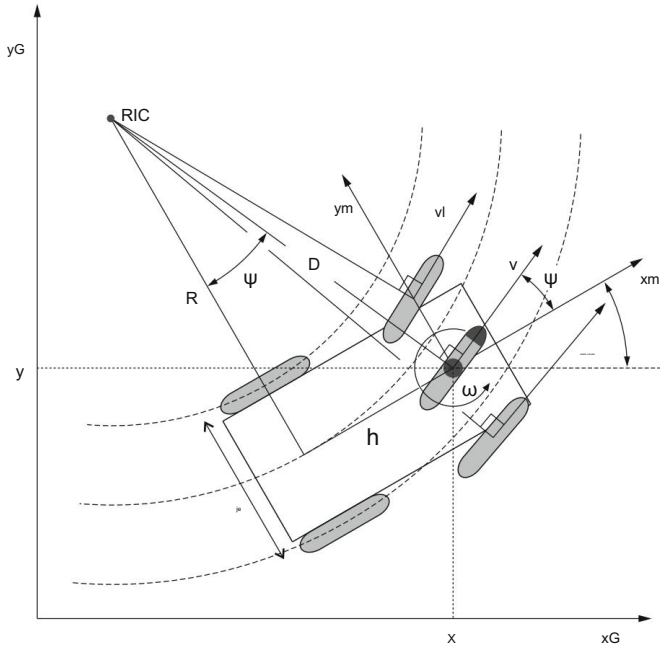


Fig. 13.7 Modèle de monocycle du robot mobile à direction semblable à une voiture

En considérant la cinématique de la voiture, la relation suivante peut être écrite à partir de la Fig. 13.7.

$$h = D \sin \psi, \quad (13.14)$$

où l'angle ψ est également l'angle entre les lignes D et R (la distance entre l'ICR et le point médian entre les roues arrière du véhicule) et h est la distance entre le centre du monocycle et le point médian entre les roues arrière du robot. La distance D peut alors être calculée comme

$$r_{\text{é}} = \frac{h}{\text{péché } \psi} \quad (13.15)$$

et la courbure de la voiture K_c est alors définie comme

$$K_c = \frac{1}{D} = \frac{\text{péché}}{\psi h}. \quad (13.16)$$

Avec K_c et K_u égaux, la relation suivante peut être obtenue

$$K_c = K_u \quad \sin \psi = \frac{\omega l}{v}. \quad (13.17)$$

Enfin, l'angle ψ vaut

$$\psi = \arcsin \frac{\omega l}{v} . \quad (13.18)$$

L'angle ψ est l'angle de braquage souhaité pour la voiture et il peut être calculé à partir de la vitesse connue v , de la vitesse angulaire ω et de la largeur de la voiture l .

Avec la relation définie entre le monocycle et un robot mobile avec d'autres cinématiques, l'analyse peut être basée sur un modèle de monocycle simple et généralisée à l'autre robot.

13.2 Navigation

Les robots mobiles opèrent souvent dans des environnements inconnus et non structurés et doivent s'auto-localiser, planifier un chemin vers un objectif, construire et interpréter la carte de l'environnement, puis contrôler leur mouvement dans cet environnement.

13.2.1 Localisation

Une différence importante entre un manipulateur et un robot mobile réside dans l'estimation de la position. Un manipulateur a une base fixe et en mesurant les positions des articulations du robot et en connaissant son modèle cinématique, il est possible de déterminer la pose de son effecteur terminal. Un robot mobile peut se déplacer comme une unité dans l'environnement et il n'existe aucun moyen direct de mesurer sa position et son orientation. Une solution générale consiste à estimer la position et l'orientation du robot par l'intégration du mouvement (vitesse) dans le temps.

Cependant, des approches plus précises et souvent aussi plus complexes sont généralement requises. Si la carte de l'environnement est connue à l'avance, les trajectoires des robots mobiles peuvent être planifiées à l'avance. Ceci est particulièrement utile lorsque l'environnement est relativement statique et qu'un fonctionnement robuste est requis, comme dans les applications industrielles. Des approches plus complexes sont basées sur la planification dynamique des trajectoires basée sur les informations des capteurs et la reconnaissance des caractéristiques de l'environnement. Le robot détermine d'abord sa propre position et planifie son mouvement à travers les zones traversables. Lorsque l'espace de travail ou les tâches changent fréquemment, il est généralement préférable de planifier de manière dynamique. Souvent, un compromis est nécessaire entre la planification préalable et la génération dynamique de plans. Afin de simplifier la tâche, des marqueurs peuvent être placés dans l'environnement. Ces marqueurs peuvent être facilement reconnus par des capteurs sur le robot et fournissent une localisation précise.

Les véhicules autoguidés en milieu industriel utilisent diverses technologies de navigation/guidage : bande magnétique, filaire, spot magnétique, laser et naturel.

La localisation et la planification des trajets sont souvent basées sur des fils électrifiés intégrés dans le sol à l'aide d'un guidage inductif. Un capteur de trajectoire de guidage est monté sur le véhicule. Le fil peut être remplacé par du ruban magnétique ou une ligne peinte (Fig. 13.8a). Dans ce dernier

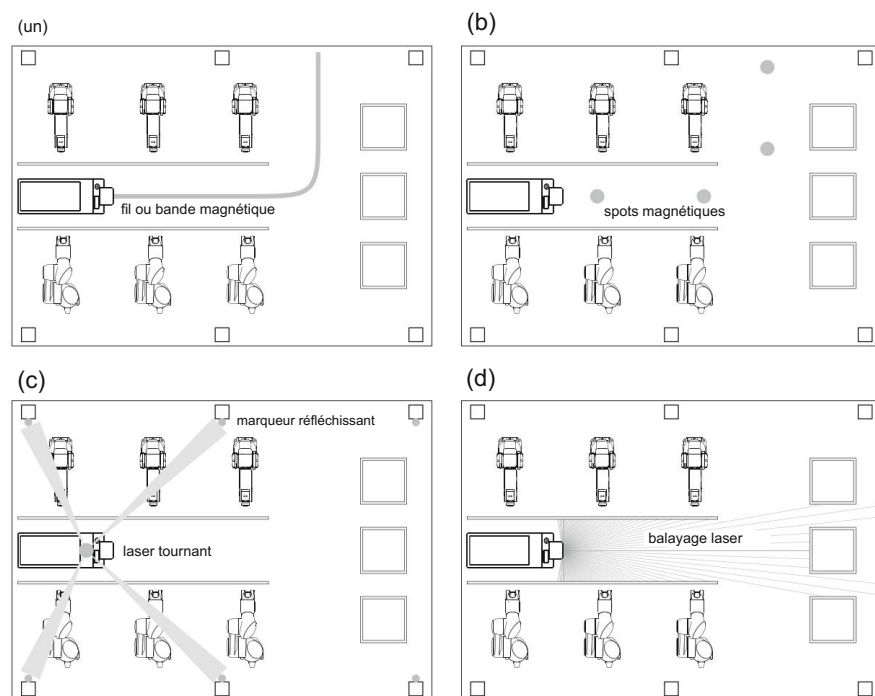


Fig. 13.8 Disque d'abstraction des capteurs de la combinaison de capteurs à bord du robot

cas où le robot utilise une caméra pour déterminer sa position relative par rapport à la ligne du sol. Les chemins sont fixes et continus. Des marqueurs uniques peuvent être placés le long de la ligne pour indiquer des positions spécifiques. Au lieu de placer des lignes et des marqueurs au sol, des marqueurs (motifs bidimensionnels) peuvent également être placés au plafond pour être identifiés par une caméra embarquée. Le guidage par point magnétique utilise un chemin marqué avec des rondelles magnétiques (Fig. 13.8b). Les chemins sont ouverts et changeants.

Les techniques de localisation au sol sont souvent remplacées par des méthodes basées sur le laser. Les méthodes de triangulation laser, dans lesquelles un laser rotatif détecte la distance et l'azimut des réflecteurs muraux, fournissent des informations de localisation précises sans qu'il soit nécessaire de suivre des lignes spécifiques sur le sol. La technologie de guidage laser utilise plusieurs points de référence fixes (bandes réfléchissantes) situés dans la zone d'opération qui peuvent être détectés par une tête laser montée sur le véhicule (Fig. 13.8c). Comme l'installation est cartographiée à l'avance, les chemins peuvent être facilement modifiés et étendus.

La navigation naturelle est basée sur des informations de l'environnement existant scannées par des scanners laser, à l'aide de quelques repères fixes (Fig. 13.8d). La zone est cartographiée à l'avance. La navigation naturelle est flexible et extensible. Il convient aux environnements qui changent fréquemment mais pas de manière significative. Dans les espaces confinés, le robot peut suivre le mur à travers l'environnement en se basant sur le mur.

Des systèmes de positionnement intérieur basés sur la radio sont également introduits qui permettent la localisation du robot de la même manière que le système de positionnement global extérieur. La localisation est basée sur la triangulation avec des balises fixes montées dans l'installation et le capteur monté sur le robot. Les distances sont calculées en mesurant le temps de parcours des ondes radio de la balise au capteur.

13.2.1.1 Odométrie

Une approche simple et couramment utilisée pour la localisation de robots consiste à s'appuyer sur l'odométrie, qui utilise des informations provenant de capteurs de mouvement (généralement des encodeurs de roue) pour estimer le changement de position dans le temps. Ces changements de position sont accumulés en utilisant des principes d'intégration fournissant la position du robot par rapport à un emplacement de départ. La méthode est sensible aux erreurs dues à l'intégration des mesures de vitesse dans le temps pour donner des estimations de position.

L'analyse du mouvement du robot commence par la compréhension de la contribution de chaque roue à la vitesse du robot. Pour le cas particulier d'un robot à entraînement différentiel ces relations sont définies en (13.6) et (13.7). La vitesse des roues peut être mesurée directement à l'aide d'un tachymètre. Si un tel capteur n'est pas disponible, la vitesse peut être estimée par différenciation numérique de la position obtenue à partir d'encodeurs.

Dans ce cas, les vitesses des roues droite et gauche peuvent être calculées comme

$$\begin{aligned} 2\pi r & \frac{nr(t) - nr(t - \Delta t)}{N\Delta t} = v_r, \\ 2\pi r & \frac{nl(t) - nl(t - \Delta t)}{N\Delta t} = v_l, \end{aligned} \quad (13.19)$$

où r est le rayon de la roue, N est la résolution du codeur en termes de comptages par tour, nr et nl sont les comptages du codeur de la roue droite et gauche au temps t , respectivement, et $nr(t - \Delta t)$ et $nl(t - \Delta t)$ sont les mêmes quantités à l'instant d'échantillonnage précédent.

La position et l'orientation du robot peuvent ensuite être estimées par intégration numérique de l'éq. (13.10) et considération de (13.6) et (13.7) comme

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \Delta t) + v \cos \theta(t - \Delta t) \Delta t, & y(t) &= y(t - \Delta t) + v \sin \theta(t - \Delta t) \Delta t, & \theta(t) &= \theta(t - \Delta t) + \omega \Delta t = \theta(t - \Delta t) + \Delta t. \frac{v_r - v_l}{2r} \end{aligned} \quad (13h20)$$

Différents facteurs réduisent l'efficacité des méthodes basées sur l'odométrie pour l'estimation de la position du robot. Un facteur très important est le patinage des roues qui réduit considérablement la précision de l'estimation de la position. Les performances peuvent être améliorées en utilisant des modèles des erreurs et du véhicule. Des spots au sol ou des aimants peuvent être utilisés pour corriger les erreurs d'odométrie qui s'accumulent entre ces points. L'odométrie peut également

être complétée par des mesures basées sur des capteurs à partir de lasers, de caméras, de systèmes d'identification par radiofréquence et de balises.

13.2.1.2 Localisation et cartographie simultanées

Des systèmes plus avancés utilisent des algorithmes qui accomplissent simultanément les sous-tâches de navigation (localisation, planification de chemin). L'approche qui concerne le problème de la construction d'une carte d'un environnement inconnu par un robot mobile tout en naviguant dans l'environnement à l'aide de la carte est appelée localisation et cartographie simultanées (SLAM). En observant les mêmes caractéristiques dans plusieurs vues à l'aide de capteurs qui se déplacent avec le véhicule, l'algorithme SLAM accumule et combine les informations des capteurs. En combinant l'estimation de la position du robot avec les informations recueillies, une carte locale peut être construite en rassemblant les données disponibles. Au fil du temps, l'environnement complet peut être cartographié et les cartes peuvent être utilisées pour planifier les trajectoires du robot.

SLAM se compose de plusieurs parties, telles que l'extraction de points de repère, l'association de données, l'estimation de l'état, la mise à jour de l'état et la mise à jour des points de repère. Il existe de nombreuses façons de résoudre chacune des plus petites parties, mais elles dépassent le cadre de ce livre.

13.2.1.3 Disque d'abstraction du capteur

Lorsque le robot mobile se déplace dans l'environnement, il doit également observer son environnement. Des capteurs à bord du robot recherchent des obstacles ou des objets inattendus sur la trajectoire du véhicule et le robot peut être en mesure de planifier un chemin autour d'eux avant de revenir à l'itinéraire pré-planifié. Une suite typique de capteurs comprend des capteurs de proximité infrarouges, des capteurs de distance à ultrasons, des scanners laser, des capteurs de vision, de détection tactile et de positionnement global. Des capteurs sont stratégiquement placés à bord du robot et autour de sa circonférence. Chaque capteur fournit des informations différentes en termes de quantité, de qualité, de portée et de résolution. Cependant, les informations provenant de tous les capteurs sont généralement combinées pour fournir une image précise de l'environnement du robot. Sans traiter spécifiquement de l'analyse des capteurs individuels et de l'intégration des informations sensorielles, il est possible de supposer que la distance et la direction de tous les obstacles du point de vue du robot peuvent être obtenues à partir de la suite de capteurs. Le disque d'abstraction de capteur présenté sur la Fig. 13.9 est un exemple d'intégration sensorielle fournissant des informations sur les obstacles dans le rayon du disque autour du robot.

A partir de la position connue x_o et de l'orientation θ_o de l'obstacle et du connu il est possible de déterminer la position de l'obstacle (x_o, y_o) dans le cadre de coordonnées global comme

$$\begin{aligned} x_o &= x + \text{faire} \cos(\theta + \theta_o), y_o \\ &= y + \text{faire} \sin(\theta + \theta_o). \end{aligned} \quad (13.21)$$

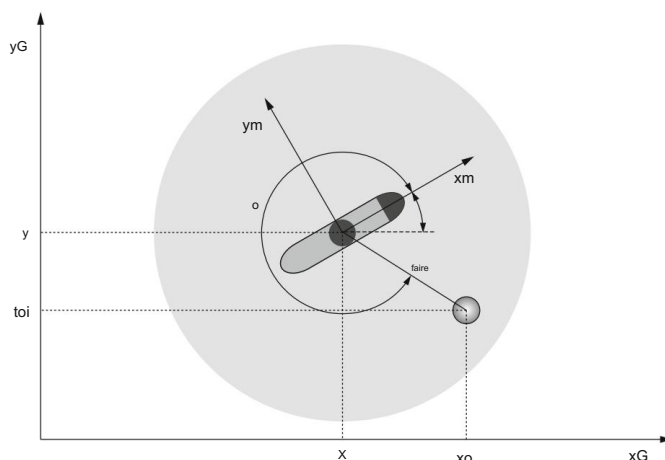


Fig. 13.9 Disque d'abstraction des capteurs de la combinaison de capteurs à bord du robot

L'analyse suivante sera basée sur les hypothèses d'un modèle de robot monocycle et les informations sur les objets obtenues à partir du disque d'abstraction du capteur.

13.2.2 Planification du chemin

La planification de trajectoire permet aux robots mobiles autonomes de suivre une trajectoire optimale sans collision de la position de départ à l'objectif sans entrer en collision avec des obstacles dans la zone de travail. Un planificateur de trajectoire idéal doit être capable de gérer les incertitudes dans le modèle du monde détecté, de minimiser l'impact des objets sur le robot et de trouver la trajectoire optimale en un minimum de temps, surtout si la trajectoire doit être négociée régulièrement. En général, la planification du chemin doit aboutir au chemin avec le coût le plus bas possible, elle doit être rapide et robuste ainsi que générique par rapport aux différentes cartes.

Différents algorithmes sont disponibles pour la planification de chemin (en temps réel). Une méthode simple consiste à combiner des segments de droite reliés par des sommets. Une autre méthode de recherche standard pour trouver le chemin optimal est l'algorithme A* avec ses modifications. L'algorithme trouve un chemin dirigé entre plusieurs points, appelés nœuds. L'environnement du robot représenté par une carte peut être décomposé en espaces libres et occupés. Ensuite, une recherche A* peut être effectuée pour trouver un chemin linéaire par morceaux à travers les nœuds libres.

Un algorithme de champ de potentiel artificiel peut être utilisé pour éviter les obstacles. L'algorithme utilise des champs de potentiel répulsifs autour des obstacles pour éloigner le robot soumis à ce potentiel et utilise un champ de potentiel attractif autour du but pour attirer le robot vers le but. Les champs répulsifs et attractifs modifient la trajectoire du robot. L'algorithme permet les opérations en temps réel d'un robot mobile dans un environnement complexe.

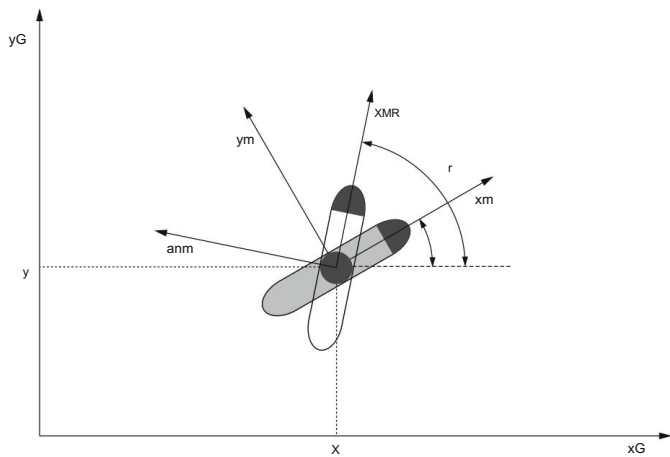


Fig. 13.10 Commande d'orientation du monocycle ; le monocycle gris représente le robot réel et le monocycle blanc représente l'orientation souhaitée

13.2.3 Contrôle de chemin

Afin d'accomplir la tâche, le robot mobile doit se déplacer de son emplacement initial à la position et à l'orientation finales souhaitées. Un système de contrôle est nécessaire pour contrôler le véhicule tout au long de sa trajectoire.

13.2.3.1 Contrôle de l'orientation

Sur la base du modèle de monocycle présenté à la Fig. 13.10, le contrôle de l'orientation sera d'abord considéré. Une approche similaire serait valable pour les robots mobiles qui peuvent changer d'orientation sans changer leur position (un robot à entraînement différentiel est un tel véhicule, mais la voiture ne l'est pas).

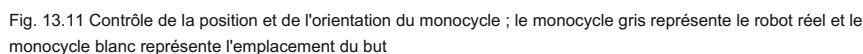
Le but du contrôle est de minimiser l'erreur d'orientation

$$\tilde{\theta} = \theta_r - \theta, \tag{13.22}$$

où θ_r est l'orientation souhaitée et θ est l'orientation réelle. Nous supposons que le contrôle est basé sur une approche de contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID)

$$PID(\tilde{\theta}) = K_p \tilde{\theta} + K_i \int \tilde{\theta} dt + K_d \dot{\tilde{\theta}} \tag{13.23}$$

ou l'une de ses subversions, comme le contrôleur proportionnel-dérivé. Ensuite, la vitesse angulaire souhaitée du robot mobile peut être calculée comme



$$\omega = K_p \tilde{e} + K_i \int \tilde{e} dt + K_d \dot{\tilde{e}} \quad (13.24)$$

Il convient de noter que les angles sont des fonctions périodiques et si nous supposons la configuration

$$r = 0 \quad = 2\pi \quad \sim \quad = -2\pi, \quad (13h25)$$

le robot tournera une fois avant d'atteindre l'orientation finale. Ce n'est généralement pas un comportement de robot souhaitable. Par conséquent, l'erreur d'orientation doit être limitée de manière à nécessiter au maximum π radians une rotation dans les deux sens

$$\sim [-\pi, \pi]. \quad (13.26)$$

Une solution simple consiste à utiliser une fonction arctan à quatre quadrants comme

$$\tilde{\varphi} = \arctan(\sin \tilde{\varphi}, \cos \tilde{\varphi}) \in [-\pi, \pi]. \quad (13.27)$$

Avec la combinaison de (13.27) et (13.24), le robot atteindra l'orientation souhaitée sans tourner plus d'un demi-cercle dans le sens positif ou négatif.

13.2.3.2 Contrôle de la position et de l'orientation

Le robot mobile se déplace généralement de son emplacement initial à son emplacement final (objectif), ce qui nécessite un changement de position et d'orientation. Étant donné que le robot doit se déplacer vers son emplacement cible, nous appellerons cette tâche aller vers l'objectif. La figure 13.11 représente une telle

conditions. La trame de coordonnées $x_m - y_m$ définit la pose actuelle du robot et la trame $x_{mr} - y_{mr}$ définit la pose cible. Le segment de ligne S représente le chemin le plus court pour accomplir la tâche.

L'orientation souhaitée du robot pour accomplir la tâche peut être définie comme l'angle entre le segment de ligne S et l'axe horizontal du cadre de coordonnées global. Avec la position souhaitée connue (x_r, y_r) et la position actuelle du robot (x, y), l'angle θ_r peut être calculé à chaque instant pendant le mouvement du robot comme

$$\theta_r = \arctan \frac{y_r - y}{x_r - x}. \quad (13.28)$$

En supposant que le robot se déplace à une vitesse d'avancement constante v_0 , le mouvement du robot dans le cadre de coordonnées global peut être décrit avec l'ensemble d'équations suivant

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_0 \cos \theta, \\ \dot{y} &= v_0 \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega = \text{PID}(\theta_r - \theta). \end{aligned} \quad (13.29)$$

Avec cette approche, le but de la commande est de maintenir une vitesse constante v_0 et de suivre l'angle souhaité θ_r calculé à partir de (13.28). Si nous supposons un robot à entraînement différentiel, les vitesses angulaires des roues peuvent alors être calculées à partir de (13.8) comme

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{2v_0 + \omega l}{2r}, \\ \omega_l &= \frac{2v_0 - \omega l}{2r}. \end{aligned} \quad (13h30)$$

Lorsqu'il se déplaçait à vitesse constante v_0 , le robot dépassait sa position cible. Par conséquent, il est raisonnable de définir la vitesse d'avancement du robot en fonction de la distance jusqu'au but

$$G = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}. \quad (13.31)$$

Avec un régulateur proportionnel, la vitesse souhaitée peut être définie comme

$$vG = K_v G, \quad (13.32)$$

où K_v est le gain de vitesse. Les équations (13.29) peuvent alors être réécrites sous la forme

$$\begin{aligned} \dot{x} &= vG \cos \theta, \\ \dot{y} &= vG \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega = \text{PID}(\theta_r - \theta) \end{aligned} \quad (13.33)$$

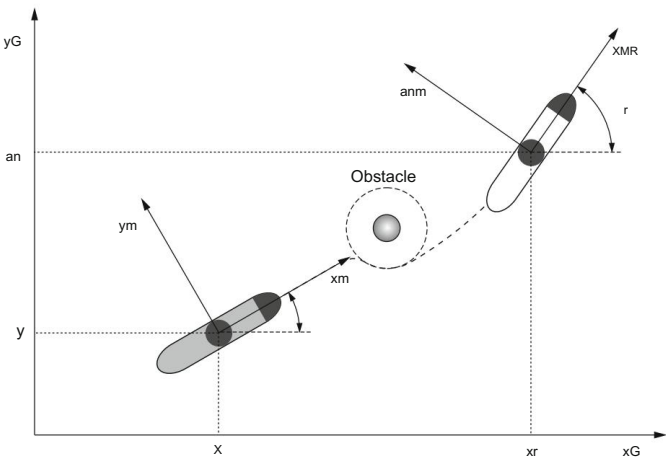


Fig. 13.12 Contrôle de position et d'orientation du monocycle avec évitement d'obstacles ; le monocycle gris représente le robot réel et le monocycle blanc représente l'emplacement du but ; le cercle gris est l'obstacle et la ligne circulaire pointillée est la zone de sécurité autour de l'obstacle

et dans (13.30) v_0 doit être remplacé par v_G . Avec cette approche, le robot ralentira à l'approche de l'emplacement du but. Étant donné que la vitesse souhaitée augmente avec la distance au but, une limite maximale peut être fixée sur v_G $[0, v_{Gmax}]$.

13.2.3.3 Évitement d'obstacles

La figure 13.12 montre des conditions avec un obstacle sur le chemin du robot vers la position cible. Le robot ne peut pas se rendre directement à l'emplacement cible sans d'abord éviter l'obstacle. Sur la base du concept du disque d'abstraction du capteur, nous supposons que le robot est capable de détecter et de localiser l'obstacle à une distance de sécurité et, en utilisant ces informations, peut planifier des activités d'évitement. L'obstacle sur la Fig. 13.12 est représenté par un cercle gris et la ligne circulaire pointillée autour de l'obstacle représente une zone de sécurité autour de l'obstacle. Le robot ne serait pas autorisé à entrer dans le cercle en pointillés.

Dans cette optique, nous avons maintenant deux objectifs de contrôle. Le premier est aller au but et le second est éviter-obstacle. Une représentation plus détaillée des deux objectifs de contrôle est illustrée à la Fig. 13.13, où u_g indique la distance du robot à l'obstacle, u_g est la variable de contrôle associée à l'objectif d'aller au but et u_o est la variable de contrôle associée à éviter -objectif obstacle. Afin de réussir la tâche, l' u_g doit pointer vers l'objectif tandis que l' u_o doit pointer loin de l'obstacle. La variable de contrôle réelle u est le résultat de la fusion de u_g et u_o .

La partie de contrôle d'aller au but peut être définie en fonction de la distance jusqu'à la position du but comme

$$u_{gx} = K_g \frac{x_r - x}{x_r - x} \cdot \frac{y_r - y}{y_r - y} \quad (13.34)$$

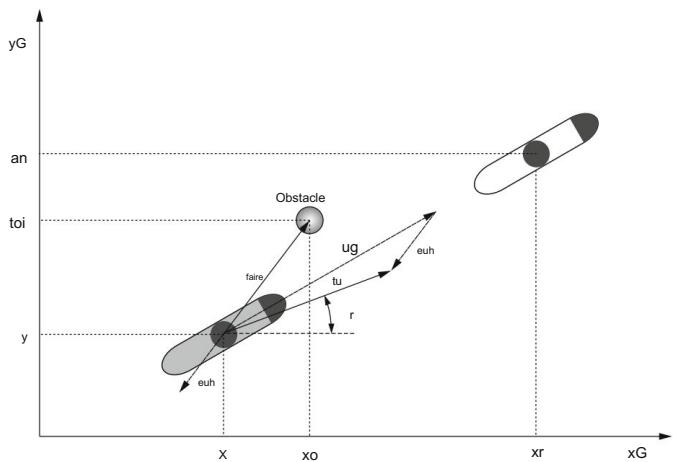


Fig. 13.13 Évitement d'obstacles sur monocycle ; le monocycle gris représente le robot réel, le monocycle blanc représente l'emplacement du but et le cercle gris est l'obstacle

De même, la variable de contrôle d'évitement d'obstacle peut être définie en fonction de la distance à l'obstacle

$$\begin{matrix} u_{ox} \\ u_{oy} \end{matrix} = K_o \begin{matrix} x - x_o \\ y - y_o \end{matrix} \quad (13h35)$$

Il convient de noter que u_g pointe vers le but et u_o s'éloigne de l'obstacle, comme le montre la définition des distances dans les deux équations ci-dessus. Le mélange des deux variables de contrôle doit être fait en fonction de la distance à l'obstacle, qui est définie comme

$$faire = \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2} \quad (13.36)$$

Lorsque le robot est loin de l'obstacle, il lui suffit de se diriger directement vers le but. Cependant, à proximité de l'obstacle, la tâche principale devient l'évitement d'obstacle. Consécutivement, le mélange peut être mis en œuvre comme

$$\begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} = \lambda(faire) \begin{matrix} u_{gx} \\ u_{gy} \end{matrix} + (1 - \lambda(faire)) \begin{matrix} u_{ox} \\ u_{oy} \end{matrix}, \lambda(d_o) \in [0, 1]. \quad (13.37)$$

Le paramètre λ peut, par exemple, être défini comme une fonction exponentielle basée sur la distance vers l'obstacle $-k d_o$ et le paramètre k définit le taux de convergence $\lambda = 1 - e^{-k d_o}$ vers 1. Comme le montre la Fig. 13.13, la variable de contrôle u définit le robot souhaité vitesses dans le référentiel global

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} \quad (13.38)$$

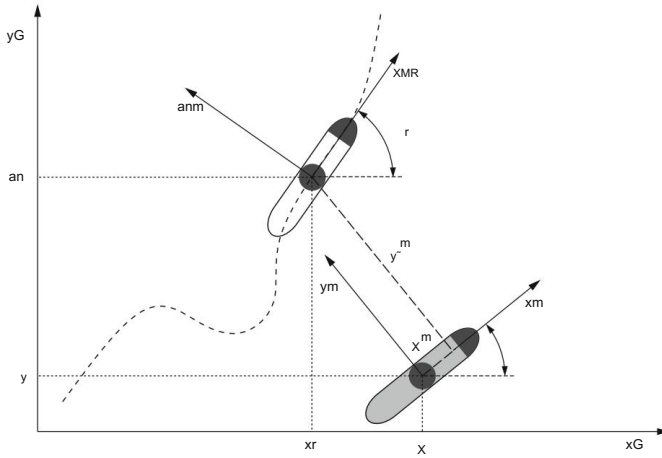


Fig. 13.14 Contrôle de suivi de voie monocycle ; le monocycle gris représente le robot réel et le cycle uni blanc représente le véhicule virtuel sur le chemin

L'orientation souhaitée du robot peut alors être calculée comme

$$r = \arctan \frac{u_y}{u_x}, \quad (13.39)$$

entraînant une vitesse angulaire

$$\dot{r} = \omega = \text{PID}(\tilde{r}). \quad (13h40)$$

La vitesse avant du robot peut être calculée comme

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = v \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta} = u \sqrt{\frac{2}{x} + \frac{2}{y}}. \quad (13.41)$$

Encore une fois, en supposant un robot à entraînement différentiel, les vitesses angulaires des roues peuvent être calculées à partir de (13.8).

13.2.3.4 Suivi de chemin

Souvent, le robot ne peut pas simplement emprunter le chemin le plus court vers l'objectif et il doit suivre un chemin prédéfini. Dans ce cas, le but du contrôle est de rester sur le chemin. La tâche peut être simplifiée en considérant un véhicule virtuel qui se déplace le long du chemin avec une vitesse prédéfinie. Ensuite, l'objectif de contrôle devient le suivi du véhicule virtuel, comme illustré à la Fig. 13.14.

L'erreur de suivi peut être définie comme

$$\tilde{x} = x_r - x, \quad (13.42)$$

où x_r et x représentent respectivement la position et l'orientation du véhicule virtuel et du robot mobile.

Toutes les grandeurs sont exprimées dans le cadre de coordonnées global et peuvent être transformées dans le cadre de coordonnées du robot comme

$$\begin{matrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{\theta} \end{matrix} = \begin{matrix} x \\ y \\ \theta \end{matrix}_m = R^J X, \quad (13.43)$$

où R est défini comme dans (13.2). La vitesse d'avancement du robot peut être calculée à partir de l'erreur de suivi le long de l'axe x_m comme

$$v = K_x \tilde{x}^m, \quad (13.44)$$

où K_x est le gain proportionnel du contrôleur. La vitesse angulaire doit tenir compte de l'erreur de poursuite angulaire $\tilde{\theta}_m = \tilde{\theta}$ ainsi que de la distance à la trajectoire $\tilde{y}_m$. À savoir, lorsque le robot est éloigné du chemin, il doit se diriger vers le chemin. Ainsi, l'algorithme de contrôle devient

$$\omega = K_y \tilde{y}^m + K_{\theta} \tilde{\theta}^m, \quad (13.45)$$

où K_y et K_{θ} sont les gains proportionnels du contrôleur. Puisque la vitesse du véhicule virtuel est connue (la vitesse angulaire peut être calculée comme le changement de direction tangentielle le long du chemin lorsque le véhicule virtuel avance), elle peut être prise en compte comme un terme de commande par anticipation. Si v_r est la vitesse d'avancement du véhicule virtuel et ω_r sa vitesse angulaire, Eqs. (13.44) et (13.45) peuvent être réécrits avec le terme d'anticipation comme

$$v = v_r \cos \tilde{\theta} + K_x \tilde{x}^m \quad (13.46)$$

et

$$\omega = \omega_r + K_y \tilde{y}^m + K_{\theta} \tilde{\theta}^m. \quad (13.47)$$

Chapitre 14

Robotique humanoïde



Avant même que la robotique moderne ne commence à se développer, les philosophes, les ingénieurs et les artistes s'intéressaient aux machines semblables aux humains. Le premier exemple connu de mécanisme humanoïde, dont la conception a été conservée et peut encore être reconstruite aujourd'hui, est un chevalier mécanique créé par Léonard de Vinci et présenté au souverain milanais Ludovico Sforza vers 1495. Le mécanisme avait une structure cinématique similaire à robots humanoïdes actuels et il pourrait se déplacer par un système de fils et de poulies.

Plus récemment, des écrivains comme Karel Capek et Isaac Asimov ont pensé à des robots qui ont une forme similaire à celle des humains. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles les robots humanoïdes sont considérés comme intéressants :

- Les environnements humains sont construits pour les humains, donc un robot à usage général conçu pour les environnements humains, par exemple, les maisons, les usines, les hôpitaux, les écoles, etc., doit avoir une forme similaire à celle des humains pour fonctionner avec succès dans de tels environnements. • Il est plus naturel pour les humains d'interagir et de communiquer avec des robots qui semblent et se comporter comme des humains.
- Un robot humanoïde peut servir d'outil expérimental pour tester les théories sur le comportement humain créées par les neuroscientifiques computationnels, intéressés par le fonctionnement du cerveau humain.

On peut dire que la robotique humanoïde moderne a commencé avec une série de robots humanoïdes créés à l'Université de Waseda à Tokyo, au Japon. Le premier de ces robots fut WABOT-1 créé en 1973.

Malgré les progrès récents dans des domaines connexes tels que la robotique douce et l'intelligence artificielle, les robots humanoïdes capables d'opérer dans des environnements peuplés d'humains, où ils collaborent et communiquent avec les gens de manière naturelle, ne sont encore qu'un rêve lointain. Actuellement, les robots humanoïdes sont au stade où ils peuvent exécuter une variété de tâches. Les tâches qui sont par exemple utilisées dans les compétitions de robots humanoïdes, par exemple le DARPA Robotics Challenge, incluent :

1. Conduire : conduire un véhicule utilitaire dans une voie bloquée par des barrières.
2. Sortie : sortez du véhicule et locomote vers une zone spécifiée.
3. Porte : ouvrez une porte et franchissez une porte.
4. Vanne : tourner une vanne actionnée par un volant.

5. Mur : utilisez un outil (perceuse ou scie) pour couper à travers un panneau de béton.
6. Tâche surprise, qui n'était connue que le jour de la compétition : enlever un
fiche magnétique d'une prise, insérez-la dans une autre prise.
7. Débris : traverser un champ de débris ou négocier un terrain irrégulier.
8. Escaliers : montez les escaliers.

Les robots humanoïdes modernes peuvent déjà exécuter de telles tâches de manière autonome, à condition que l'état approximatif de l'environnement soit connu à l'avance. Cependant, il est encore difficile pour les robots humanoïdes modernes d'effectuer de telles tâches sans certaines informations préalables sur les conditions environnementales qui peuvent être exploitées par un programmeur pour préparer le robot humanoïde à l'exécution de tâches multiples. L'intégration et le séquençage continu de plusieurs actions de robots restent un problème et un certain degré de téléopération est toujours nécessaire lors de l'exécution de séquences de tâches plus longues.

Alors que la plupart des méthodologies robotiques standard concernant la cinématique, la dynamique, le contrôle, la planification de trajectoire et la détection des robots sont également pertinentes lors du développement de robots humanoïdes, la robotique humanoïde doit traiter plusieurs problèmes spécifiques. Le premier est le problème de la locomotion et de l'équilibre du bipède. Contrairement aux autres robots, les robots humanoïdes doivent marcher et garder l'équilibre pendant leur fonctionnement. Dans le défi de la robotique mentionné ci-dessus, la locomotion s'est avérée être l'un des plus gros problèmes. L'indicateur de base qui décrit l'équilibre d'un robot humanoïde est le concept de point de moment zéro, généralement abrégé en ZMP. Le concept de ZMP a été introduit par Miomir Vukobratović en 1968. C'est encore l'approche la plus largement utilisée pour générer des mouvements de marche dynamiquement stables dans lesquels le ou les pieds d'appui restent en contact avec la surface du sol à tout moment. Ceci est important pour empêcher le robot de tomber. Les concepts de base liés à ZMP sont décrits dans la Sect. 14.1.

Un autre problème spécifique qui se pose lors de la programmation des robots humanoïdes est le nombre très élevé de degrés de liberté dont ils ont besoin par rapport aux robots industriels standards. Alors que les robots industriels typiques n'ont que 6 et rarement 7 degrés de liberté, les robots humanoïdes ont souvent plus de 30 degrés de liberté. Par exemple, l'un des robots humanoïdes les plus connus Honda Asimo a 34 degrés de liberté : 3 dans la tête, 7 dans chaque bras (3 dans l'épaule, 1 dans le coude et 3 dans le poignet), 1 à la taille, 6 dans chaque jambe et 2 dans chaque main. Un si grand nombre de degrés de liberté rend la programmation robotique classique avec des pendentifs d'apprentissage et des langages de programmation textuels peu pratique. Au lieu de cela, nous pouvons exploiter la similitude entre les robots humanoïdes et les humains. En raison de cette similitude, les robots humanoïdes peuvent effectuer des tâches de la même manière que les humains. Ce fait donne lieu à l'idée qu'au lieu de programmer un robot humanoïde, un enseignant humain peut montrer au robot comment exécuter la tâche souhaitée. Le robot peut alors tenter de reproduire l'exécution humaine. Cette manière de programmer des robots est appelée programmation par démonstration ou apprentissage par imitation. Son application réussie nécessite qu'un robot transfère le mouvement démontré à sa propre structure cinématique et dynamique. De plus, comme les environnements naturels sont rarement statiques mais changent souvent, le robot ne peut pas simplement reproduire les mouvements observés.

Au lieu de cela, les mouvements observés doivent être adaptés aux conditions environnementales actuelles. Ces sujets sont abordés dans la Sect. 14.2.

14.1 Locomotion du bipède

La locomotion bipède est un sujet important en robotique humanoïde. Nous nous intéressons ici à la marche, qui se distingue des autres formes de locomotion bipède comme la course par la contrainte qu'au moins un pied doit toujours être en contact avec le sol.

Comme expliqué dans l'introduction, la plupart des robots humanoïdes modernes exploitent le principe du point de moment zéro pour générer des schémas de marche stables.

14.1.1 Point de moment zéro

Tout au long de cette section, nous supposons que le sol est plat et orthogonal à la gravité. Nous commençons par analyser la distribution d'une composante verticale des forces de réaction au sol (c'est-à-dire la composante orthogonale au sol, comme le montre la Fig. 14.1). Le point de moment nul est défini comme le point d'intersection de la résultante de ces forces avec le sol. Nous nous concentrons d'abord sur le mouvement dans le plan sagittal (c'est-à-dire le plan qui divise le corps en parties gauche et droite). Comme le montre la Fig. 14.1, une composante de la force de réaction au sol orthogonale au sol doit être positive à tous les points de contact, sinon le pied perdrait le contact avec le sol car il n'y est pas rigidement attaché. Le point de moment zéro p_x selon la définition ci-dessus peut être calculé comme suit

$$p_x = \frac{\int_{x_b}^x x f_z(x) dx}{f_n}, \quad (14.1)$$

$$f_n = \int_{x_b}^x f_z(x) dx, \quad (14.2)$$

où $f_z(x)$ est la composante verticale de la force de réaction du sol au point de contact x et f_n la force de réaction verticale nette du sol. La raison pour laquelle p_x est appelé point de moment zéro devient claire si le moment à p_x est calculé :

$$\begin{aligned} \tau(p_x) &= - \int_{x_b}^x (x - p_x) f_z(x) dx = - \int_{x_b}^x x f_z(x) dx + p_x \int_{x_b}^x f_z(x) dx \\ &= -(p_x - p_x) = 0. \end{aligned} \quad (14.3)$$

Ici, nous avons intégré le moment $\tau = -(x - p_x) f_z$ sur toute la surface de la semelle, c'est-à-dire f_z . Ainsi, le moment net au point de moment zéro p_x est égal à zéro. Le $x_b \leq x \leq x_e$ moment zéro est généralement abrégé en ZMP. C'est le point sur la surface du sol où le moment cinétique net est égal à zéro. S'il existe, ZMP est contraint de se trouver dans le polygone de support.

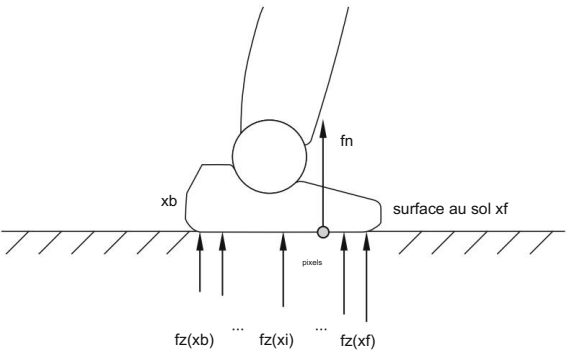


Fig. 14.1 Forces de réaction au sol $fz(xi)$ à différents points de contact xi . Le point de moment zéro px et la force de réaction au sol nette orthogonale à la surface de support fn sont calculés selon les équations. (14.1) et (14.2), respectivement

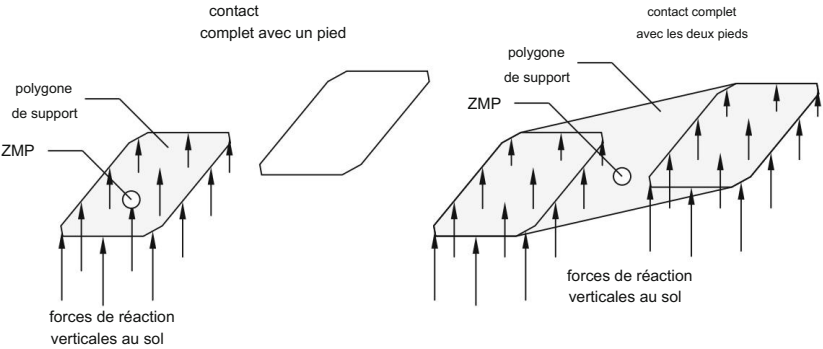


Fig. 14.2 Le polygone de support (la zone délimitée par une ligne grise) est défini comme l'enveloppe convexe de tous les points en contact avec le sol. À gauche : le polygone d'appui correspond à la zone de la semelle lorsqu'un seul pied est en contact total avec le sol. A droite : le polygone d'appui correspond à la coque convexe des coins des deux pieds lorsque les deux pieds sont en plein contact avec le sol

Pour un robot humanoïde général marchant en 3D, le mouvement latéral doit également être pris en compte. Comme le montre la Fig. 14.2, il faut distinguer deux cas : soit un seul pied est en plein contact avec le sol, soit les deux pieds sont en plein contact avec le sol. Le sol est supposé plat à la hauteur pz . La dérivation de ZMP est basée sur la relation entre le moment autour du point $p = (px, py, pz)$ de la force de réaction verticale du sol $[0, 0, fz(\xi)]$ à tous les points $\xi = (\xi x, \xi y, pz)$ sur la surface de contact. Le moment est donné par

$$\tau(p) = \begin{pmatrix} \xi y - py \\ \xi x - px \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ fz(\xi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\xi y - py) fz(\xi) \\ -(\xi x - px) fz(\xi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14.4)$$

Pour obtenir le moment autour du point $p = (p_x, p_y, p_z)$ dû aux forces de réaction orthogonales du sol $[0, 0, f_z(\xi)]$ apparaissant à tous les points de contact ξ entre la semelle et le sol, nous devons intégrer sur tous les points de contact

$$\tau_n(p) = \int_S \begin{pmatrix} \xi_x - p_x \\ \xi_y - p_y \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_z(\xi) \end{pmatrix} dS = \begin{pmatrix} - \int_S (\xi_y - p_y) f_z(\xi) dS \\ \int_S (\xi_x - p_x) f_z(\xi) dS \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (14.5)$$

où S désigne la zone de contact. De même que dans le cas 2D, le point au sol où le moment de la normale de la force de réaction au sol devient nul (c'est-à-dire le point de moment zéro $\tau_n(p) = 0$), est donné par

$$p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_S \xi_x f_z(\xi) dS \\ \int_S \xi_y f_z(\xi) dS \\ \int_S f_z(\xi) dS \end{pmatrix} \frac{1}{f_n}, \quad (14.6)$$

où

$$f_n = \int_S f_z(\xi) dS \quad (14.7)$$

est la somme des forces de réaction du sol orthogonales au sol à tous les contacts entre la semelle et le sol.

Sur un robot humanoïde réel, ZMP (s'il existe) est garanti de se trouver dans le polygone de support car si le contact entre la semelle et la surface du sol existe, la composante de la force de réaction au sol orthogonale au sol doit être positive.

Sinon, le contact entre la semelle et la surface du sol serait perdu car le robot n'est pas fixé au sol et ne peut donc pas générer des forces de réaction au sol verticales négatives. Le robot humanoïde ne peut contrôler sa posture avec ses pieds que si le ZMP existe à l'intérieur du polygone de support. Sinon, le robot perd le contact avec le sol et ne peut plus contrôler la posture avec ses pieds.

14.1.2 Génération de modèles de marche

En marche bipède, les pieds du robot alternent entre deux phases :

- phase d'appui dans laquelle la position du pied ne doit pas changer, •
- phase de balancement dans laquelle le pied bouge.

La figure 14.3 montre ces deux phases distinctes du cycle de marche : lorsque les deux pieds sont en contact avec le sol, le robot est en phase de double appui. Les pieds ne bougent pas dans cette phase. Une fois que l'un des pieds commence à bouger, le robot passe de la phase d'appui double à simple, au cours de laquelle l'un des deux pieds bouge. La phase d'appui simple est suivie d'une autre phase d'appui double une fois que le pied en phase pendulaire établit un contact avec le sol.

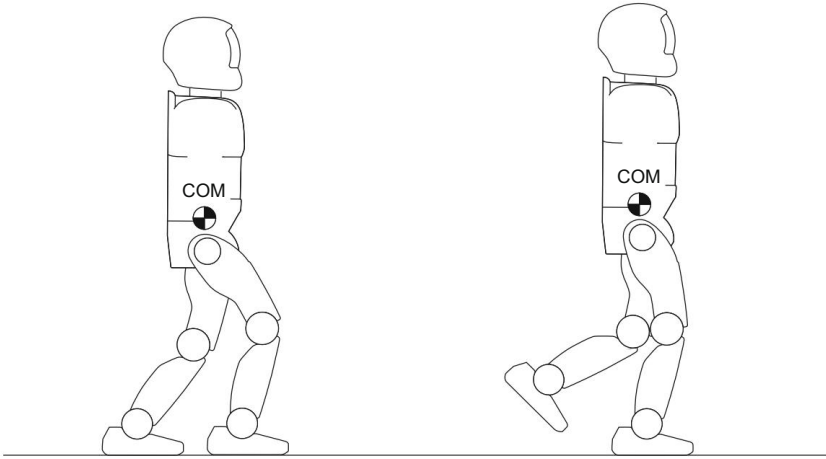


Fig. 14.3 Phase d'appui simple et double. Dans la phase de double appui, les deux pieds sont en contact avec le sol et le poids du robot est supporté par les deux jambes. Dans la phase d'appui unique, un pied est en mouvement, tandis que l'autre pied supportant le robot est en contact avec le sol

Dans la marche basée sur ZMP, un ou les deux pieds du robot sont toujours en contact avec le sol. Ainsi ZMP existe et le robot peut garder l'équilibre en s'assurant que le polygone de support contient le ZMP. Cependant, le robot ne peut pas contrôler directement le ZMP tel que défini dans les équations. (14.1) et (14.6). Nous introduisons donc la notion de centre de masse (COM). ZMP peut être contrôlé en exploitant sa relation avec COM.

Le centre de masse (COM) est défini comme la position moyenne de toutes les parties du corps d'un robot humanoïde, pondérée par la masse des parties du corps. Pour un robot avec des liaisons rigides D , COM peut être calculé comme suit :

$$c = \frac{\sum_{i=1}^D m_i c_i}{M}, \quad M = \sum_{j=1}^D m_j, \quad (14.8)$$

où m_i est la masse du i -ième maillon et c_i sa position, qui peut être calculée par cinématique directe à condition que le centre de masse de chaque maillon soit connu dans les coordonnées locales du maillon. Avec quelques approximations, la relation entre ZMP et COM peut être spécifiée comme suit

$$p_x = c_x - \frac{(c_z - p_z)\ddot{c}_x}{\ddot{c}_z + g}, \quad (14.9)$$

$$p_y = c_y - \frac{g(c_z - p_z)}{\ddot{c}_y - \ddot{c}_z + g}, \quad (14.10)$$

où p_z désigne la hauteur du rez-de-chaussée, g est la constante de gravité et $c = (c_x, c_y, c_z)$ et $p = (p_x, p_y, p_z)$ sont les coordonnées de COM et ZMP, respectivement.

Notez que si le robot est au repos, c'est-à-dire $\dot{c}_x = \dot{c}_y = 0$, alors ZMP et la projection de COM coïncident car $p_x = c_x$ et $p_y = c_y$. Notez également que si le sol est plat et orthogonal à la gravité, comme nous l'avons supposé dans la Sect. 14.1.1, p_z est une constante.

En général, nous distinguons la marche statique de la marche dynamique. La marche statique est définie comme tout mouvement de marche stable où la projection de COM reste toujours à l'intérieur du polygone de support. Cela signifie que si le robot s'arrête complètement de bouger à tout moment pendant la marche, il ne tombe pas car pour le robot au repos, la projection de COM sur la surface du sol est égale au ZMP (voir les équations (14.9) et (14.10)). En marche statique, le mouvement doit généralement être lent pour que la projection du COM soit proche du ZMP. Ce type de marche nécessite généralement de grands pieds et des articulations de cheville solides pour générer des forces suffisantes au niveau des chevilles. Au fur et à mesure que le mouvement du robot devient plus rapide, ZMP et la projection de COM deviennent plus différents et la stabilité ne peut pas être assurée en contrôlant uniquement la projection de COM.

Des comportements de marche plus efficaces sont générés par des modèles de marche dynamiques, où la projection de COM n'est pas égale à ZMP et peut tomber en dehors du polygone de support pendant une certaine période de mouvement. Un modèle de marche dynamique basé sur ZMP est illustré à la Fig. 14.4. De tels schémas sont prévus pour que la ZMP reste à l'intérieur des limites du polygone de support dans toutes les phases de la marche. Ceci peut être accompli comme suit :

- Spécifiez le mouvement cartésien des pieds du robot. Ici, la longueur de pas du robot et la synchronisation du mouvement du pied sont prescrites. •

Spécifier la trajectoire ZMP de référence pour que ZMP reste dans le support polygone à tout moment.

- Déterminer le mouvement du haut du corps du robot humanoïde afin de réaliser le mouvement ZMP de référence. Ceci peut être accompli en utilisant les équations. (14.9) et (14.10). • Le mouvement des jambes du robot humanoïde est finalement calculé à partir du corps et des pieds mouvement utilisant la cinématique inverse.

Le mouvement de COM n'est pas entièrement spécifié par les équations. (14.9) et (14.10) car il n'y a que deux équations et trois paramètres inconnus. Pour spécifier complètement le mouvement de COM et par conséquent le mouvement du haut du corps du robot humanoïde, une contrainte supplémentaire doit être imposée. Il existe plusieurs approches possibles. Le plus simple d'entre eux consiste à définir la hauteur de COM à une valeur constante (c'est-à-dire, $c_z = \text{const}$, $\dot{c}_z = 0$).

Avec cette hypothèse, le mouvement de COM est entièrement spécifié par Eqs. (14.9) et (14.10).

Un mouvement plus adaptable et plus actif peut être obtenu si c_z est autorisé à varier.

Notez que l'approche ci-dessus détermine le mouvement de COM sans tenir compte des jambes. Cependant, étant donné que la majeure partie de la masse est généralement concentrée dans le haut du corps d'un robot humanoïde et qu'il n'est pas nécessaire de suivre exactement la trajectoire ZMP prescrite, l'approche ci-dessus est suffisante pour générer des modèles de marche dynamiquement stables.

Si un modèle précis du robot est disponible, la marche bipède peut être réalisée en suivant simplement un schéma de marche prédéterminé. En raison du bruit et des inexactitudes des modèles, une telle approche ne se traduit généralement pas en pratique par un comportement de marche stable.

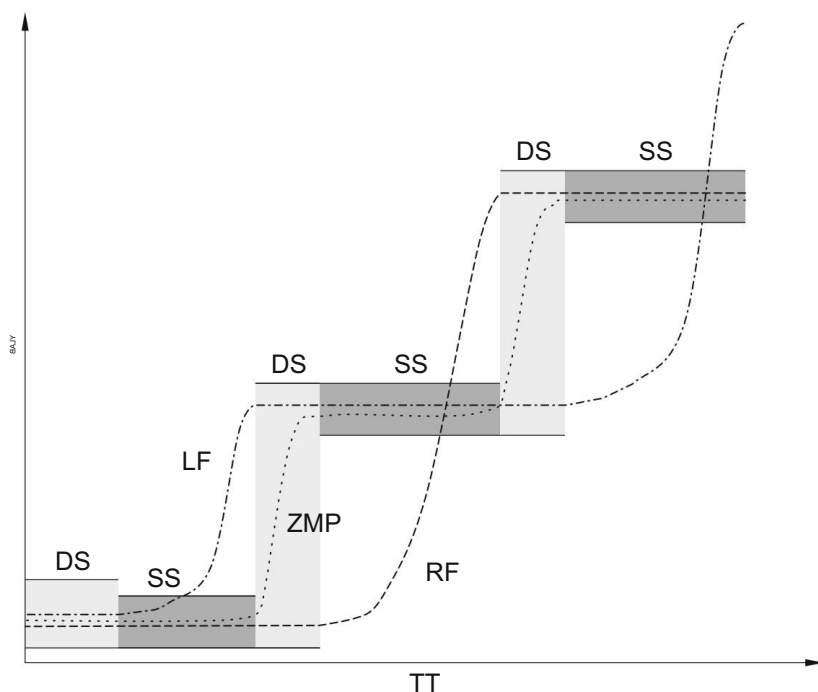


Fig. 14.4 Un exemple de modèle de marche basé sur ZMP dans le plan sagittal. Le robot commence avec les deux pieds placés à peu près parallèlement au sol, puis génère trois pas, en commençant par le pied gauche. Les zones ombrées montrent l'étendue du polygone de support pendant la phase de support simple (zone ombrée foncée) et la phase de support double (zone ombrée claire). La trajectoire ZMP (en pointillés) est planifiée de telle sorte qu'elle reste dans le polygone de support pendant toute la durée de la marche. Les trajectoires des deux pieds (gauche : tirets pointillés, droite : tirets) sont également affichées

sans compléter le modèle de marche précalculé par un stabilisateur qui modifie le modèle en fonction de l'entrée sensorielle fournie par les gyroscopes, les accéléromètres, les capteurs de force, les caméras, etc.

Il convient de souligner que ZMP n'est pas le seul principe qui peut être utilisé pour générer des modèles de marche stables. Il est possible de générer un modèle de marche où un robot est instable pendant une certaine période de mouvement. De tels schémas de marche doivent être planifiés pour que le robot puisse récupérer des instabilités avant de tomber au sol.

14.2 Apprentissage par imitation

Pour exploiter pleinement leur potentiel, les robots humanoïdes doivent être capables d'effectuer une variété de tâches dans des environnements non structurés (par exemple, des maisons, des hôpitaux, des magasins, des bureaux et même des environnements extérieurs). Le défi robotique susmentionné visait

vers des robots humanoïdes sur les sites de catastrophes. Contrairement à de nombreux environnements industriels, où les robots sont largement utilisés aujourd'hui, de tels environnements ne peuvent pas être préparés à l'avance pour faciliter le fonctionnement d'un robot humanoïde. La programmation des robots humanoïdes est encore compliquée par le grand nombre de degrés de liberté impliqués dans le mouvement des robots humanoïdes. Par conséquent, les techniques classiques de programmation de robots basées sur des pendentifs d'apprentissage, des systèmes de simulation hors ligne soigneusement préparés et des langages de programmation ne sont pas suffisants pour les humanoïdes. Au lieu de cela, il est nécessaire d'équiper les robots humanoïdes de capacités d'apprentissage et d'adaptation. De cette façon, ils peuvent être programmés plus facilement et même acquérir des connaissances supplémentaires de manière autonome.

L'apprentissage des comportements des robots humanoïdes est un problème difficile car l'espace de tous les mouvements des robots humanoïdes qui doit être exploré est très grand et augmente de façon exponentielle avec le nombre de degrés de liberté. Une solution à ce problème consiste à concentrer l'apprentissage sur les parties de l'espace de mouvement du robot qui sont réellement pertinentes pour la tâche souhaitée. Ceci peut être réalisé par apprentissage par imitation, également appelé programmation par démonstration. Avec cette approche, un enseignant humain montre à un robot comment effectuer la tâche souhaitée. Pour que cela fonctionne, un robot doit être capable d'extraire les informations importantes de la démonstration humaine et de reproduire les parties essentielles de l'exécution de la tâche. Bien que dans la plupart des cas, il ne soit pas nécessaire de reproduire exactement les mouvements démontrés pour exécuter avec succès la tâche souhaitée, il est avantageux que le robot puisse imiter autant que possible le mouvement démontré. Étant donné que le corps d'un robot humanoïde est similaire à un corps humain, l'apprentissage par imitation est souvent une bonne approche pour concentrer l'apprentissage sur les parties pertinentes de l'espace de mouvement du robot humanoïde.

14.2.1 Observation du mouvement humain et de son transfert au mouvement du robot humanoïde

Il existe de nombreux systèmes et technologies de mesure possibles qui peuvent être utilisés pour observer et mesurer les mouvements humains. Ils comprennent

- systèmes optiques de capture de mouvement,
- ensembles d'unités de mesure inertielle (UMI),
- méthodes de vision par ordinateur pour l'estimation du mouvement humain,
- exosquelettes passifs,
- guidage manuel.

Dans ce qui suit, nous expliquons les principaux avantages et inconvénients de ces systèmes.

14.2.1.1 Dispositifs de suivi optique pour la capture de mouvement humain

Les trackers optiques sont basés sur un ensemble de marqueurs attachés à un corps humain. Les marqueurs peuvent être passifs ou actifs. Les marqueurs passifs sont constitués de matériaux rétro réfléchissants, qui réfléchissent la lumière dans la direction d'où elle vient. Dans les systèmes avec passif

marqueurs, les caméras sont équipées d'une bande de diodes électroluminescentes infrarouges (DEL). La lumière émise rebondit sur le marqueur dans la direction de la caméra, rendant le marqueur beaucoup plus lumineux que tout autre point de l'image. Cette propriété rend les marqueurs rétro réfléchissants faciles à détecter dans les images de la caméra. En utilisant la triangulation, un emplacement de marqueur 3D peut être calculé si le marqueur est détecté dans au moins deux images de caméra acquises simultanément. Le mouvement prédit des marqueurs visibles est utilisé pour faire correspondre les marqueurs visibles extraits à deux instants de mesure successifs.

Contrairement aux balises passives qui réfléchissent la lumière, les balises actives sont équipées de LED et émettent ainsi leur propre lumière. Par conséquent, ils doivent être alimentés. Les trackers optiques avec des marqueurs actifs n'éclairent généralement qu'un seul marqueur à la fois pendant une très courte période. Ainsi, le système sait toujours quel marqueur est actuellement visible, fournissant ainsi l'identité du marqueur. Pour cette raison, les systèmes de suivi optique avec des marqueurs actifs peuvent faire face aux occlusions temporaires plus efficacement que les systèmes avec des marqueurs passifs car un marqueur actif occlus peut être identifié une fois qu'il redevient visible. Ce n'est pas le cas des marqueurs passifs. D'autre part, puisque les marqueurs actifs nécessitent de l'énergie, ils doivent être connectés à une source d'alimentation avec des câbles. Cela les rend plus encombrants à utiliser que les marqueurs passifs qui ne nécessitent aucun câble.

Pour mesurer le mouvement humain, des marqueurs passifs et actifs doivent être fixés aux segments du corps humain aux endroits appropriés. Habituellement, au moins trois marqueurs sont attachés à chaque segment de corps, sinon l'emplacement des segments de corps rigides ne peut pas être estimé. Diverses combinaisons spéciales de capture de mouvement ont été conçues dans le passé pour faciliter la fixation de marqueurs sur les segments corporels concernés.

Les systèmes de suivi optique avec des marqueurs actifs ou passifs fournissent des emplacements 3D de marqueurs attachés au corps humain qui sont actuellement en vue. La position et l'orientation 3D d'un segment corporel peuvent être estimées si au moins trois marqueurs attachés au segment sont visibles. Afin de reproduire le mouvement observé avec un robot, ces informations doivent être liées au mouvement du robot. Avec un certain degré de précision, le mouvement humain peut être modélisé comme un mouvement articulé de parties rigides du corps. Si la cinématique d'un robot humanoïde est suffisamment proche de la cinématique du corps humain, nous pouvons l'intégrer dans un corps humain comme le montre la figure 14.5. Un tel encastrement peut ensuite être utilisé pour estimer les angles d'articulation à partir des orientations de segments corporels successifs. Supposons que l'orientation de deux segments corporels successifs soit donnée par les matrices d'orientation R_1 et R_2 et que l'articulation reliant les deux segments soit constituée de trois axes articulaires successifs j_1 , j_2 et j_3 avec des angles de rotation notés ϕ , θ et ψ , respectivement. Nous supposons en outre que deux axes articulaires consécutifs sont orthogonaux et que les trois axes se coupent en un point commun. Dans une telle disposition, les trois angles d'articulation correspondant aux angles d'Euler introduits au Chap. 4. Il existe au total 12 combinaisons d'axes d'articulation différentes qui couvrent toutes les dispositions possibles d'axes dans des articulations à trois degrés de liberté. Dans la Fig. 14.5, les articulations du torse, du cou, de l'épaule, du poignet et de la cheville peuvent être décrites par une combinaison appropriée d'angles d'Euler. La relation entre ces valeurs est donnée par

$$R_1 = R(j_1, \phi) R(j_2, \theta) R(j_3, \psi) R_2 = R(\phi, \theta, \psi) R_2. \quad (14.11)$$

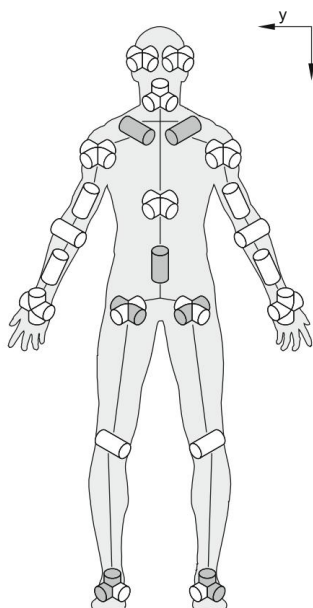


Fig. 14.5 Structure cinématique d'un robot humanoïde. En position debout bras et jambes étendus, tous les axes articulaires sont parallèles à l'un des trois axes principaux du corps (avant/arrière : axe x, gauche/droite : axe y, haut/bas : axe z)

Les angles articulaires ϕ , θ et ψ peuvent alors être calculés en résolvant l'équation

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_1 R_2 \dots R_n \quad (14.12)$$

Cette équation dépend du choix des axes articulaires j_1 , j_2 et j_3 . Le mouvement observé peut être reproduit par un robot une fois que tous les angles d'articulation pertinents du modèle intégré ont été estimés.

Les systèmes de suivi optique peuvent également estimer avec précision la position et l'orientation absolues du corps humain dans un système de coordonnées mondial. Comme la racine de la cinématique d'un robot humanoïde est généralement supposée se trouver au cadre de coordonnées local attaché au torse, la position et l'orientation estimées du torse correspondent à la position et à l'orientation absolues du corps humain dans les coordonnées mondiales.

14.2.1.2 Unités de mesure inertielle (IMU)

Les unités de mesure inertielle (IMU) contiennent différents capteurs, notamment des accéléromètres pour mesurer l'accélération linéaire 3D et des gyroscopes pour mesurer le taux de changement d'orientation 3D (c'est-à-dire la vitesse angulaire). Les IMU comprennent également souvent des magnétomètres pour fournir des mesures redondantes afin d'améliorer la précision et de réduire les

dérive. A partir de ces données, la position et l'orientation d'une IMU peuvent être estimées comme expliqué dans la Sect. 7.2.6.

Dans le contexte du transfert du mouvement humain au mouvement du robot humanoïde, les données IMU peuvent être utilisées pour estimer la position et l'orientation de chaque segment corporel auquel est attachée une IMU. Tout comme avec les trackers basés sur des marqueurs, les angles des articulations peuvent être estimés à partir des orientations des segments corporels successifs à l'aide de l'équation. (14.12).

Contrairement aux systèmes de suivi optique, les IMU ne souffrent pas d'occlusions car aucune caméra externe n'est nécessaire pour mesurer le mouvement de l'IMU. D'autre part, les IMU ne sont pas aussi précis que les systèmes de suivi optique car ils impliquent l'intégration de l'accélération linéaire et de la vitesse angulaire. L'intégration peut également entraîner une dérive, en particulier lors de l'estimation de la position et de l'orientation absolues du corps dans l'espace. La dérive peut être réduite en développant des filtres appropriés qui exploitent la redondance existant dans les mesures obtenues à partir d'accéléromètres, de gyroscopes et de magnétomètres.

14.2.1.3 Exosquelettes passifs et guidage manuel

Un problème crucial auquel tous les systèmes ci-dessus doivent faire face est qu'ils mesurent le mouvement humain sans tenir compte des différences entre la cinématique et la dynamique de l'homme et du robot. De telles mesures doivent souvent être adaptées aux contraintes du robot, sinon le robot ne peut pas exécuter les mouvements démontrés. Alternativement, un problème d'optimisation non linéaire peut être formulé pour adapter le mouvement démontré aux capacités d'un robot cible.

Le problème du transfert du mouvement humain au mouvement du robot peut être évité en appliquant différents systèmes de mesure. Une possibilité est de concevoir un dispositif passif spécial, qui se porte comme un exosquelette avec les degrés de liberté qui correspondent aux degrés de liberté du robot. L'exosquelette passif doit être conçu de manière à ne pas restreindre le mouvement pour la plupart des mouvements. Il n'a pas de moteurs, mais il devrait être équipé de goniomètres pour mesurer les angles des articulations. Les angles articulaires mesurés par l'exosquelette peuvent être utilisés pour piloter directement le robot si la cinématique du robot cible correspond à la cinématique de l'exosquelette. Un inconvénient des exosquelettes passifs est que, comme les vêtements, ils doivent être construits à la taille spécifique d'un démonstrateur humain.

Comme expliqué dans la Sect. 12.3.2, certains robots peuvent être physiquement guidés à travers les mouvements souhaités (voir aussi Fig. 14.6). Pendant le guidage manuel, le mouvement est enregistré par les propres capteurs d'angle d'articulation du robot et est donc réalisable cinématiquement par défaut. Cette approche est efficace si le robot est conforme et peut compenser la gravité, de sorte qu'un démonstrateur humain puisse facilement le déplacer dans la direction souhaitée.

Le principal inconvénient du guidage manuel est que la démonstration du mouvement souhaité est moins naturelle pour un démonstrateur humain que, par exemple, lorsque des systèmes de suivi basés sur des marqueurs sont utilisés. Ainsi, avec de tels systèmes, il n'est parfois pas aussi facile de démontrer des mouvements complexes. Par exemple, le guidage manuel n'est pas efficace pour démontrer des mouvements de danse complexes. D'autre part, la danse peut être facilement démontrée directement par un humain et mesurée avec un tracker optique, des IMU ou un exosquelette passif.

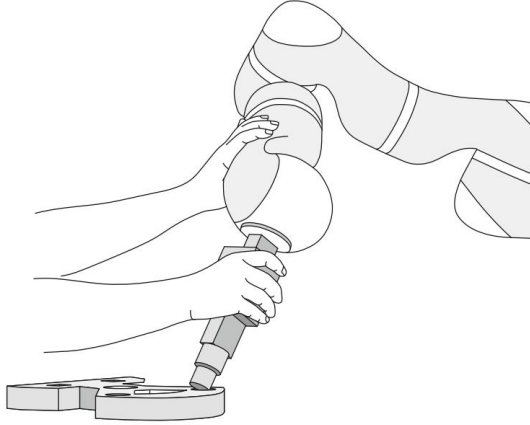


Fig. 14.6 Démonstration de la tâche peg-in-hole par enseignement kinesthésique. Le démonstrateur humain guide le bras anthropomorphique tout au long de l'exécution de la tâche avec ses propres mains

14.2.2 Primitives de mouvement dynamique

Insecte. 14.2.1 nous avons discuté de la façon de mesurer les manifestations humaines et de transformer les mouvements mesurés en trajectoires d'angle d'articulation du robot. Dans certains cas, il est également nécessaire d'adapter le mouvement mesuré aux capacités cinématiques et dynamiques du robot cible. Typiquement, on se retrouve avec une séquence de mesure

$$\{y_d(t_j), t_j\}_{j=1}^J, \quad (14.13)$$

où $y_d(t_j)$ sont les angles d'articulation mesurés au temps t_j , D est le nombre de degrés de liberté et T est le nombre de mesures. Cette séquence définit la trajectoire de référence. Cependant, pour un contrôle efficace, nous devons générer des commandes de moteur avec le taux d'asservissement du robot cible. Le taux d'asservissement du robot est souvent supérieur au taux de capture du système de mesure. Ainsi, à partir des données de mesure (14.13), nous devons générer une trajectoire de référence continue afin de générer des commandes motrices pour contrôler le robot à la vitesse appropriée.

Dans cette section, nous présentons les Dynamic Movement Primitives (DMPs), qui fournissent un cadre complet pour l'apprentissage efficace par imitation et le contrôle des mouvements du robot. Les DMP sont basés sur un ensemble d'équations différentielles non linéaires avec une dynamique d'attracteur bien définie. Pour un seul degré de liberté de robot, ici désigné par y et considéré comme l'un des D angles d'articulation enregistrés, le système suivant d'équations différentielles linéaires à coefficients constants est analysé pour dériver un DMP

$$\tau \dot{z}' = \alpha z(\beta z(g - y) - z), \quad \tau \dot{y}' = \quad (14.14)$$

$$z. \quad (14.15)$$

Notez que la variable auxiliaire z est juste une vitesse mise à l'échelle de la variable de contrôle y . Les constantes αz et βz ont une interprétation en termes de raideur et d'amortissement du ressort. Pour les constantes convenablement sélectionnées αz , βz , $\tau > 0$, ces équations forment un système dynamique linéaire globalement stable avec g comme attracteur ponctuel unique. Nous nous référons souvent à g comme le but du mouvement. Cela signifie que pour toute configuration de départ $y(0) = y_0$, la variable y atteint la configuration cible g après un certain temps, tout comme un ressort tendu, lors du relâchement, reviendra à sa position de repos. τ est appelée constante de temps. Elle affecte la vitesse de convergence vers le point attracteur g .

14.2.3 Propriétés de convergence des systèmes dynamiques linéaires

Analysons pourquoi le système ci-dessus est utile. Commençons par écrire une solution générale du système d'équations différentielles linéaires non homogènes (14.14) et (14.15). Il est bien connu que la solution générale d'un tel système peut s'écrire comme la somme de la solution particulière et homogène

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_h(t) \\ y_h(t) \end{bmatrix}. \quad (14.16)$$

Ici $\begin{bmatrix} z_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix}$ désigne toute fonction qui résout le système linéaire (14.14)–(14.15), tandis que $\begin{bmatrix} z_h(t) \\ y_h(t) \end{bmatrix}$ solution générale de la partie homogène des équations. (14.14)–(14.15), c'est-à-dire

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} -\alpha z & \beta z \\ y & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = U N \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}, \quad U_n = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} -\alpha z & -\alpha \beta z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Il est facile de vérifier que la fonction constante $\begin{bmatrix} z_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix}$ résout le système d'équations (14.14) et (14.15). De plus, il est bien connu que la solution générale de système homogène (14.17) est donné par $\begin{bmatrix} z_h(t) \\ y_h(t) \end{bmatrix} = \exp(\Lambda t) c$, où $c \in \mathbb{R}^2$ est une constante arbitraire. Ainsi, la solution générale des Eqs. (14.14) et (14.15) peuvent s'écrire

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} + \exp(\Lambda t) c. \quad (14.17)$$

La constante c doit être calculée à partir des conditions initiales $\begin{bmatrix} z(0) \\ y(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$. Les valeurs propres de A sont données par $\lambda_{1,2} = -\alpha z \pm \alpha \sqrt{4\alpha\beta z / (2\tau)}$. Solution si la (14.17) converge vers $[0, g]$ partie réelle des valeurs propres $\lambda_{1,2}$ est inférieure à 0, ce qui est vrai pour tout αz , βz , $\tau > 0$. Le système est amorti de manière critique, ce qui signifie que y converge vers g sans osciller et plus rapidement que pour tout autre choix de A , si A a deux valeurs propres négatives égales. Cela se produit à $\alpha z = 4\beta z$ où $\lambda_{1,2} = -\alpha z / (2\tau)$.

14.2.4 Primitives de mouvement dynamique pour les mouvements point à point

Le système d'équations différentielles (14.14)–(14.15) garantit que y converge vers g à partir de tout point de départ y_0 . Il peut donc être utilisé pour réaliser des mouvements point à point simples. Pour augmenter un ensemble plutôt limité de trajectoires pouvant être générées par (14.14) et (14.15) et permettre ainsi la génération de mouvements généraux point à point, nous pouvons ajouter une composante non linéaire à l'Eq. (14.14). Cette fonction non linéaire est souvent appelée terme de forçage. Un choix standard consiste à ajouter une combinaison linéaire de fonctions de base radiales Ψ_i

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x)} x(g - y_0), \quad (14.18)$$

$$\Psi_i(x) = \exp -h_i (x - c_i)^2, \quad (14.19)$$

où c_i sont les centres des fonctions de base radiales distribuées le long de la phase de la trajectoire et $h_i > 0$. Le terme $g - y_0$, $y_0 = y(t_1)$, est utilisé pour mettre à l'échelle la trajectoire si la configuration initiale et/ou finale change. Tant que le début et la fin du mouvement sont maintenus constants, ce facteur d'échelle n'a aucun effet et peut être omis. La variable de phase x est utilisée dans le terme de forçage (14.18) au lieu du temps pour rendre plus implicite la dépendance de la politique de contrôle résultante au temps. Sa dynamique est définie par

$$\tau \dot{x} = -\alpha x, \quad (14.20)$$

avec la valeur initiale $x(0) = 1$. Une solution à (14.20) est donnée par

$$x(t) = \exp(-\alpha t / \tau). \quad (14.21)$$

La propriété attrayante d'utiliser la variable de phase x au lieu du temps explicite est qu'en modifiant de manière appropriée l'Eq. (14.20), l'évolution du temps peut être arrêtée pour tenir compte des perturbations au cours du mouvement. Il n'est pas nécessaire de gérer l'horloge interne du système. On obtient le système suivant d'équations différentielles non linéaires

$$\tau \dot{z} = \alpha z(\beta z(g - y) - z) + f(x), \quad \tau \dot{y} = z. \quad (14.22)$$

$$(14.23)$$

La variable de phase x et par conséquent $f(x)$ tendent vers 0 lorsque le temps augmente. Par conséquent, l'influence du terme non linéaire $f(x)$ diminue avec le temps. Par conséquent, grâce à l'intégration du système (14.22)–(14.23), les variables système $[z, y]$ sont garantis, tout convergent vers $[0, g]$ comme le système linéaire (14.14)–(14.15). La politique de contrôle g spécifiées par la variable y et ses dérivées de premier et second ordre définissent ce que nous appelons une primitive de mouvement dynamique. (DPM). Pour un système à plusieurs degrés de

liberté, chaque degré de liberté est représenté par son propre système d'équations différentielles (14.22)–(14.23), alors que la phase x est commune à tous les degrés de liberté. Cela peut être fait parce que la phase Eq. (14.20) n'inclut pas les variables y et z .

Il suffit généralement de déterminer les paramètres c_i et h_i de l'Eq. (14.19) en définissant un modèle de distribution prédéfini et en augmentant le nombre de fonctions de base N jusqu'à ce que la précision de reconstruction souhaitée puisse être atteinte. Par exemple, pour un N donné on peut définir

$$c_i = \exp -\alpha x \quad \frac{j e - 1}{N - 1} \quad , \quad j e = 1, \dots, N, \quad (14.24)$$

$$\text{salut} \quad \frac{2}{(c_{i+1} - c_i)} \quad \frac{1}{2}, \quad i = 1, \dots, N - 1, \quad h_N = h_{N-1}. \quad (14h25)$$

Notons que $c_1 = 1 = x(0)$ et $c_N = \exp(-\alpha x) = x(t_T)$.

Dans les équations ci-dessus, αx , αz et βz sont définis sur des valeurs constantes. Les valeurs doivent être choisies de telle sorte que la convergence du système dynamique sous-jacent soit assurée comme expliqué dans la Sect. 14.2.3. C'est le cas si on pose $\alpha x = 2$, $\beta z = 3$, $\alpha z = 4\beta z = 12$.

Les DMP ont été conçus pour fournir une représentation qui permet un codage précis des mouvements point à point souhaités et permet en même temps de moduler différentes propriétés de la trajectoire codée. Dans ce contexte, les paramètres de forme w_i sont déterminés pour que le robot puisse suivre avec précision la trajectoire souhaitée en intégrant le système d'équations (14.20), (14.22) et (14.23). Les autres paramètres sont utilisés pour la modulation et pour tenir compte des perturbations.

Pour un mouvement à deux degrés de liberté, la Fig. 14.7 montre un tracé graphique des champs d'attracteurs générés par la primitive de mouvement dynamique. Le champ d'attracteurs change avec l'évolution de la phase x . Tant que le robot suit la trajectoire démontrée, le champ d'attraction ordonne au robot de se déplacer le long de la trajectoire démontrée. Cependant, si le robot est perturbé et s'écarte de la trajectoire démontrée, les champs d'attracteurs générés le long de la phase x dirigent le robot pour qu'il atteigne la configuration finale souhaitée (but), quoique le long d'une trajectoire modifiée.

Une trajectoire peut être reproduite à partir d'un DMP entièrement spécifié en intégrant les Eqs. (14.22), (14.23) et (14.20) en utilisant la méthode d'intégration d'Euler :

$$z_{k+1} = z_k + \frac{\Delta t}{T} (\alpha z (\beta z (g - y_k) - z_k) + f(x_k)) \Delta t, \quad (14.26)$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{\Delta t}{T} z_i \Delta t, \quad (14.27)$$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\Delta t}{T} \alpha x x_k \Delta t, \quad (14.28)$$

où $\Delta t > 0$ est la constante d'intégration généralement réglée sur la vitesse d'asservissement du robot. Les paramètres initiaux d'intégration doivent être définis sur l'état actuel du robot, qui

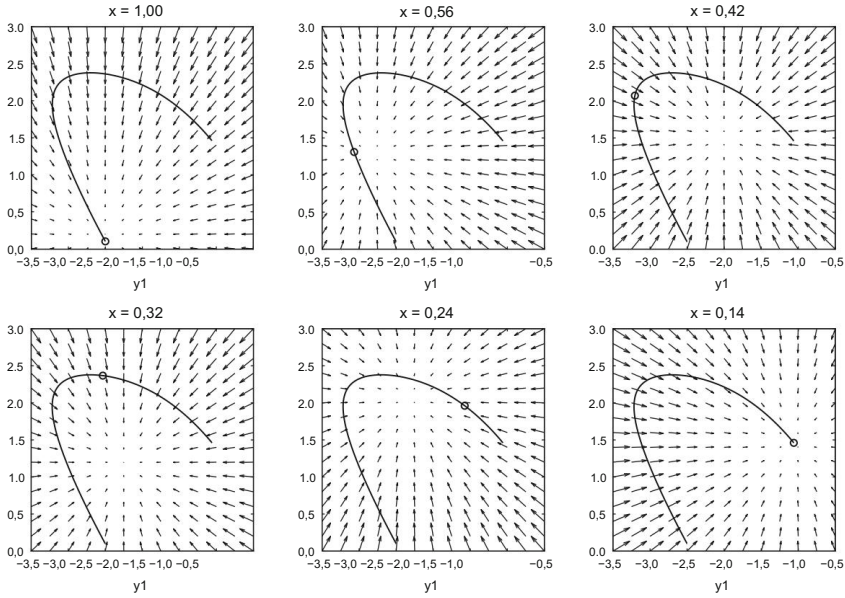


Fig. 14.7 Tracés de champs d'attracteurs générés par un DMP spécifiant le mouvement d'un robot à deux degrés de liberté y_1, y_2 car il est intégré le long de la phase x . Les flèches de chaque graphique montrent $\dot{z}^1, \dot{z}^2$ à différentes valeurs de y_1, y_2 à la phase x donnée, en supposant que seuls y_1 et y_2 ont changé par rapport à la trajectoire non perturbée. Les cercles montrent les configurations souhaitées y_1, y_2 à la phase donnée x

au début du mouvement est supposé être à la position initiale donnée et avec vitesse nulle. Il en résulte les formules d'initialisation suivantes : $y_0 = y_0, z_0 = 0, x = 1$.

14.2.5 Estimation des paramètres DMP d'une seule démonstration

Pour estimer le DMP représentant la séquence de mesure (14.13), on calcule d'abord les dérivées $y^{(j)}$ et $y^{(j)}$ par dérivation numérique. Pour l'un des degrés D de liberté y , on obtient la séquence de mesure suivante

$$\{y_d(t_j), y^{(j)}(t_j), y^{(j)}(t_j)\}_{j=1}^J, \quad (14.29)$$

où $y(t_j), y^{(j)}(t_j), y^{(j)}(t_j)$ sont les positions, vitesses et accélérations mesurées sur la trajectoire d'entraînement et T est le nombre de points d'échantillonnage. En utilisant la représentation du mouvement DMP, la trajectoire de tout mouvement fluide peut être approximée en estimant les paramètres w_i de l'Eq. (14.18). A cet effet nous

réécrire le système de deux équations linéaires du premier ordre. (14.22) et (14.23) comme une équation du second ordre. Cela se fait en remplaçant z par $\tau y'$ dans l'Eq. (14.22). On obtient

$$\tau^2 y'' + \alpha \tau y' - \alpha \beta z(g - y) = f(x), \quad (14h30)$$

avec f défini comme dans l'Eq. (14.18). Notez que la constante de temps τ doit être la même pour tous les degrés de liberté. Un choix possible est $\tau = t_T - t_1$, où $t_T - t_1$ est la durée du mouvement d'entraînement. D'autre part, le point d'attraction g varie selon les degrés de liberté. Elle peut être extraite directement des données : $g = y_d(t_T)$. En écrivant

$$F_d(t_j) = \tau^2 y''(t_j) + \alpha \tau y'(t_j) - \alpha \beta z(g - y_d(t_j)), \quad (14.31)$$

$$f = \begin{matrix} F_d(t_1) \\ \dots \\ F_d(t_T) \end{matrix}, \quad w = \begin{matrix} w_1 \\ \dots \\ w_N \end{matrix},$$

on obtient le système d'équations linéaires suivant

$$Xw = f, \quad (14.32)$$

qui doit être résolu pour estimer les poids d'un DMP codant le mouvement souhaité. La matrice du système X est donnée par

$$X = (g - y_0) \begin{matrix} \frac{\psi_1(x_1)}{N} \frac{\psi_1(x_1)}{\psi_1(x_1)} x_1 & \dots & \frac{\psi_N(x_1)}{N} \frac{\psi_N(x_1)}{\psi_N(x_1)} x_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\psi_1(x_T)}{N} \frac{\psi_1(x_T)}{\psi_1(x_T)} x_T & \dots & \frac{\psi_N(x_T)}{N} \frac{\psi_N(x_T)}{\psi_N(x_T)} x_T \end{matrix}. \quad (14.33)$$

Les points d'échantillonnage de phase x_j sont obtenus en insérant les temps de mesure t_j dans l'Eq. (14.21). Les paramètres w peuvent être calculés en résolvant le système d'équations linéaires ci-dessus dans le sens des moindres carrés. Un exemple d'estimation DMP est illustré à la Fig. 14.8. Le DMP calculé assure que le robot atteint le point attracteur g au temps t_T . Étant donné que les DMP ont été conçus pour représenter des mouvements point à point, le mouvement démontré doit s'arrêter complètement à la fin de la démonstration si le robot doit rester au point attracteur. Si, au contraire, le type de mouvement est approximé par un DMP, le robot dépassera le point d'attraction et y reviendra après que la dynamique du système linéaire d'équations différentielles du second ordre commence à dominer le mouvement. Au moins théoriquement, la vitesse n'a pas besoin d'être nulle au début du mouvement, mais il est difficile d'imaginer un véritable système de programmation par démonstration dans lequel une telle trajectoire serait acquise.

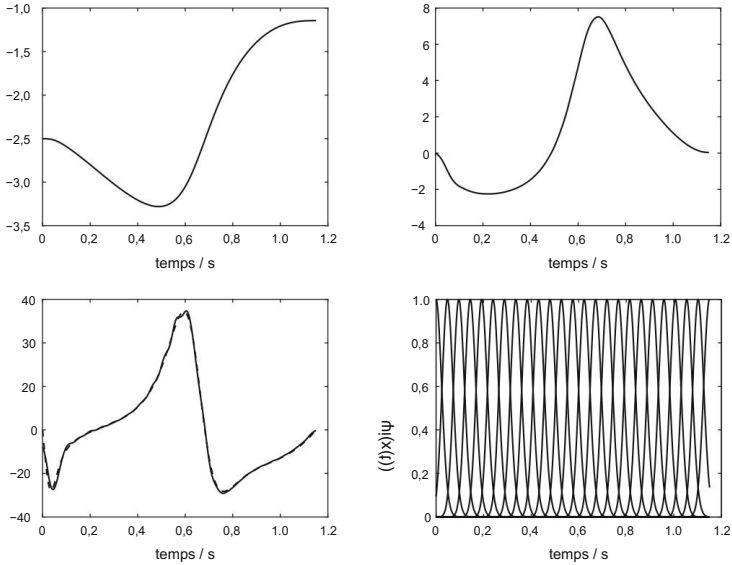


Fig. 14.8 Evolution temporelle d'un exemple de primitive de mouvement dynamique : variable de contrôle y et sa dérivée, la phase x et les fonctions de base radiale ψ sont toutes représentées par des lignes pleines. Les lignes pointillées montrent les valeurs démontrées de y , y' et y'' .

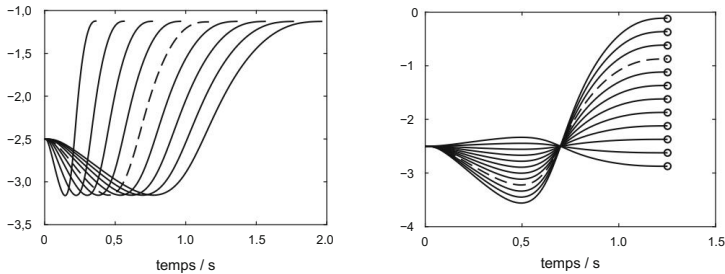


Fig. 14.9 Modulations DMP. Les trajectoires en pointillés montrent le DMP d'origine sans appliquer aucune modulation. À gauche : Modulation du temps. Les trajectoires solides montrent des DMP avec τ modifié. À droite : objectif modulation. Les trajectoires pleines montrent les DMP avec un objectif modifié g . Les cercles indiquent la position du but.

14.2.6 Modulation des DMP

Un avantage important des DMP est qu'ils permettent une modulation aisée des mouvement. La figure 14.9 à gauche montre qu'en changeant le paramètre τ le mouvement peut être accéléré ou ralenti. La même figure montre également qu'en modifiant l'objectif paramètre g , la configuration finale sur la trajectoire peut être modifiée pour que le robot se déplace vers un nouvel objectif. Le terme $y_0 - g$ dans le terme de forçage (14.18) assure que le mouvement est adapté à mesure que l'objectif ou la configuration initiale change.

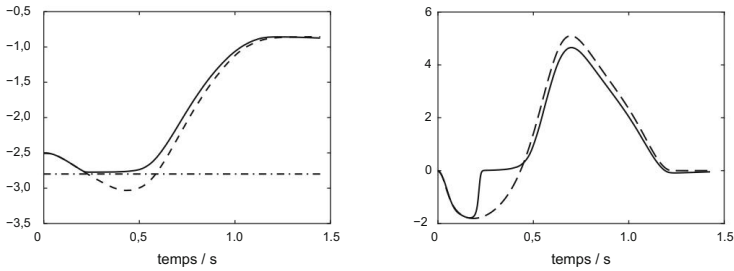


Fig. 14.10 Modulation DMP avec évitement de limite conjointe à $y = -2,8$. Les trajectoires pleines montrent la trajectoire du DMP et sa vitesse obtenue en intégrant (14.34) au lieu de (14.23), tandis que les trajectoires en pointillés montrent le DMP original et sa vitesse sans appliquer aucune modulation

Des modulations plus complexes impliquent de changer les équations différentielles sous-jacentes. (14.22), (14.23) et/ou (14.20). Par exemple, l'éq. (14.23) peut être changé en

$$\tau \dot{y} = z - \frac{\rho}{(y_L - y)^3} \quad (14.34)$$

pour mettre en œuvre l'évitement d'une limite commune inférieure. Cela se produit parce qu'une fois que y commence à approcher y_L , le dénominateur de l'équation. (14.34) devient petit et il y a une différence significative entre l'intégration de l'Eq. (14.23) ou (14.34). La figure 14.10 à droite montre que le second terme de l'Eq. (14.34) agit comme une force répulsive, empêchant y de s'approcher trop près de y_L . D'autre part, le dénominateur dans l'Eq. (14.34) reste grand tant que l'angle articulaire y est éloigné de la limite articulaire y_L . Ainsi,

dans ce cas, il y a peu de différence entre l'intégration de l'Eq. (14.23) ou (14.34) et la trajectoire générée par le DMP suit le mouvement démontré. Notez qu'il n'est pas nécessaire d'apprendre de nouveaux paramètres w_i , objectif g ou constante de temps τ en raison de la modulation. Ils peuvent rester tels qu'ils ont été initialement appris. Seul l'éq. (14.23) doit être changé en (14.34) pour assurer l'évitement de la limite commune pendant le contrôle en ligne.

La propriété attrayante d'appliquer la variable de phase au lieu du temps est que nous pouvons facilement moduler l'évolution temporelle de la phase, par exemple en accélérant ou en ralentissant un mouvement selon le cas au moyen de termes de couplage. Au lieu d'intégrer les Eqs. (14.20) et (14.23) au moment de l'exécution, les équations modifiées. (14.20) et (14.36) pourraient être intégrés

$$\tau \dot{x} = -1 \frac{\alpha x}{+ \alpha p x (y - \tilde{y}) \tau \dot{y}^2}, \quad (14h35)$$

$$z + \alpha p y (y - \tilde{y}), \quad (14.36)$$

où y et $\tilde{y}$ désignent respectivement la position angulaire souhaitée et réelle de l'articulation du robot, respectivement. Si le robot ne peut pas suivre le mouvement souhaité, $\alpha p x (y - \tilde{y})$ devient grand, ce qui à son tour rend le changement de phase $\dot{x}$ petit. Ainsi l'évolution de phase est stoppée jusqu'à ce que le robot rattrape la configuration souhaitée y . Cette volonté

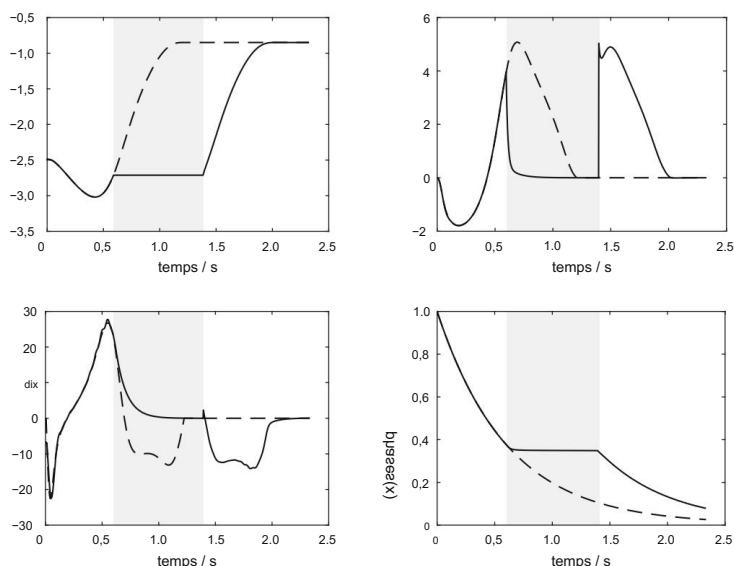


Fig. 14.11 L'effet de l'arrêt de phase causé par le blocage de l'évolution de la position de l'articulation y dans l'intervalle de temps $[0,6, 1,4]$ (zone grise). Les trajectoires en pointillés montrent le DMP d'origine, la vitesse, l'accélération et l'évolution de la phase, tandis que les trajectoires pleines montrent leurs homologues du mouvement perturbé avec l'arrêt de phase activé. Notez qu'en dehors de l'intervalle de temps $[0,6, 1,4]$ où le mouvement de l'articulation est bloqué, le robot suit avec précision le mouvement souhaité

éventuellement arriver en raison du terme ajouté dans l'équation. (14.36). En revanche, si le robot suit précisément le mouvement souhaité, alors $\ddot{y} - \ddot{y} \approx 0$ et Eqs. (14.35) et (14.36) ne sont pas différents des Eqs. (14.20) et (14.23), respectivement. Ainsi dans ce cas le mouvement généré par le DMP n'est pas altéré. La figure 14.11 illustre l'effet de l'arrêt de phase lorsque le mouvement du robot est temporairement bloqué.

En résumé, les DMP fournissent une représentation efficace pour apprendre les trajectoires des robots humanoïdes et pour contrôler les robots humanoïdes. Ils sont basés sur des équations différentielles non linéaires autonomes qui sont garanties pour créer des politiques de contrôle cinématiques fluides. Une propriété importante des DMP est qu'ils peuvent être appris à partir d'une seule démonstration de la tâche souhaitée. Elles présentent plusieurs avantages par rapport aux autres représentations motrices dont

- ils possèdent des paramètres libres et faciles à apprendre afin de reproduire n'importe quel mouvement,
- ils ne sont pas explicitement dépendants du temps et permettent une modulation temporelle,
- ils sont robustes aux perturbations,
- ils sont faciles à moduler en adaptant divers paramètres et équations.

En raison de leur flexibilité et de leur robustesse, les DMP sont considérés comme une méthode de choix lors de l'apprentissage de trajectoires de robots à partir de démonstrations uniques.

Chapitre 15

Précision et répétabilité des manipulateurs industriels



Dans ce chapitre, nous examinerons brièvement les critères de performance et les méthodes de test des manipulateurs de robots industriels tels que décrits dans la norme ISO 9283. Avant d'aborder la précision et la répétabilité des manipulateurs industriels, nous résumerons les informations de base sur les robots manipulateurs.

Les données de base du robot comprennent généralement un dessin schématique de la structure mécanique du robot :

- robot cartésien (Fig. 15.1 à gauche), • robot cylindrique (Fig. 15.1 à droite), • robot polaire (sphérique) (Fig. 15.2 à gauche), • robot anthropomorphe (Fig. 15.2 à droite), • robot SCARA (Fig. 15.3).

Dans tous les dessins, les degrés de liberté du mécanisme du robot doivent être marqués.

Le dessin doit également inclure le cadre de coordonnées de base et le cadre d'interface mécanique qui sont déterminés par le fabricant.

Le schéma montrant les limites de l'espace de travail (Fig. 15.4) revêt une importance particulière. La portée maximale du bras du robot doit être clairement indiquée dans au moins deux plans. L'amplitude de mouvement de chaque axe du robot (degré de liberté) doit être indiquée. Le fabricant doit également spécifier le centre de l'espace de travail c_w , où se déroulent la plupart des activités du robot.

Les données du robot doivent être accompagnées des paramètres de chargement caractéristiques, tels que la masse (kg), le couple (Nm), le moment d'inertie (kgm^2) et la poussée (N). La vitesse maximale doit être donnée à vitesse constante, lorsqu'il n'y a ni accélération ni décélération. Les vitesses maximales pour des axes de robot particuliers doivent être données avec la charge appliquée à l'effecteur final. La résolution de chaque mouvement d'axe (mm°), la description du système de contrôle et les méthodes de programmation doivent également être présentées.

Les trois cadres de coordonnées du robot les plus pertinents (droitiers) sont illustrés à la Fig. 15.5. Le premier est le cadre de coordonnées universel $x_0-y_0-z_0$. L'origine de la trame est définie par l'utilisateur. L'axe z_0 est parallèle au vecteur de gravité, mais dans le sens opposé. Le deuxième est le cadre de coordonnées de base $x_1-y_1-z_1$, dont l'origine est définie par le fabricant. Ses axes sont alignés avec le segment de base du robot.

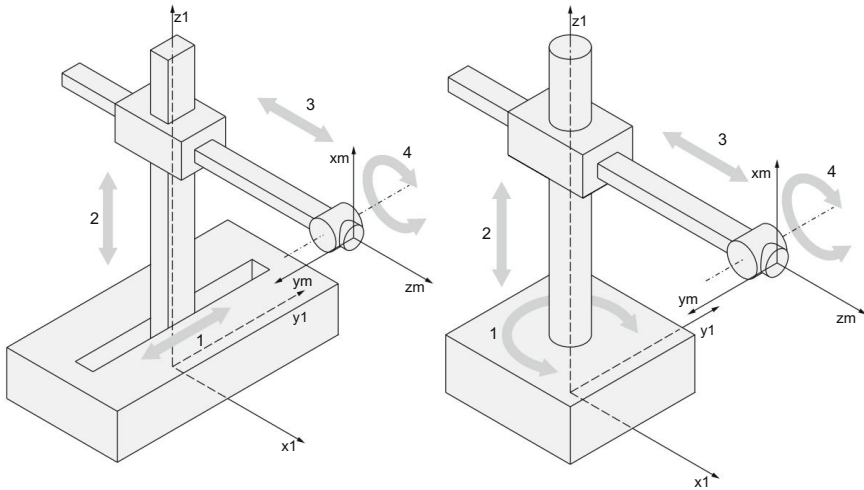


Fig. 15.1 Structures mécaniques du robot cartésien (à gauche) et du robot cylindrique (à droite)

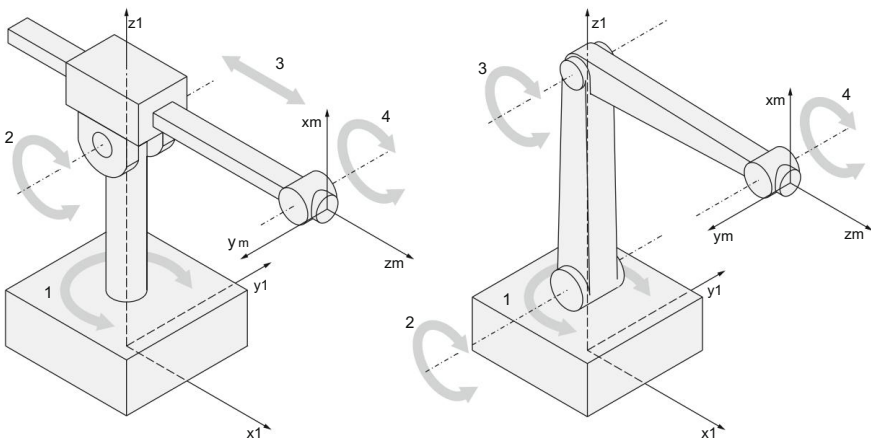


Fig. 15.2 Structure mécanique du robot polaire (à gauche) et du robot anthropomorphe (à droite)

L'axe positif z_1 pointe perpendiculairement à l'opposé de la surface de montage de la base.

L'axe x_1 passe par la projection du centre de l'espace de travail du robot cw .

Le référentiel $x_m-y_m-z_m$ est appelé référentiel de coordonnées de l'interface mécanique. Son origine est placée au centre de l'interface mécanique (paume du robot) reliant le bras du robot au préhenseur. L'axe z_m positif s'éloigne de l'interface mécanique vers l'effecteur terminal. L'axe x_m est situé dans le plan défini par l'interface, qui est perpendiculaire à l'axe z_m .

Les directions positives des mouvements du robot, spécifiées comme les déplacements de translation et de rotation, sont illustrées à la Fig. 15.6.

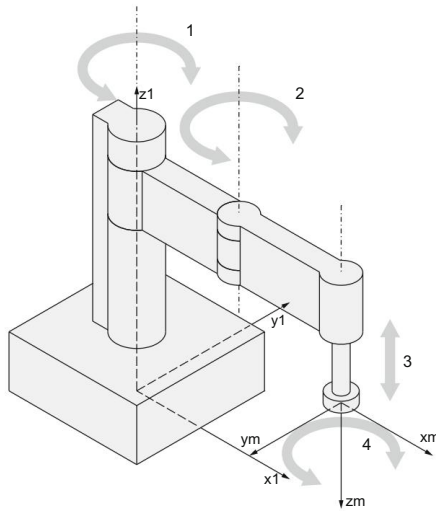


Fig. 15.3 Structure mécanique du robot SCARA

La norme ISO 9283 traite des critères et des méthodes d'essai des manipulateurs de robots industriels. Il s'agit de la norme la plus importante car elle facilite le dialogue entre les fabricants et les utilisateurs des systèmes robotiques. Elle définit la manière dont les caractéristiques de performance particulières d'un robot manipulateur doivent être testées. Les tests peuvent être effectués pendant la phase d'acceptation du robot ou à différentes périodes d'utilisation du robot afin de vérifier la précision et la répétabilité des mouvements du robot.

Les caractéristiques du robot, qui affectent de manière significative les performances d'une tâche de robot, sont les suivantes :

- précision et répétabilité de la pose (la pose est définie comme la position et l'orientation d'un segment de robot particulier, généralement effecteur terminal),
- précision et répétabilité de la distance,
- temps de stabilisation de la pose,
- dépassement de la pose,
- dérive de la précision et de la répétabilité de la pose.

Ces paramètres de performance sont importants dans les tâches de robot point à point. Des paramètres similaires sont définis pour les cas où l'effecteur final du robot se déplace le long d'une trajectoire continue. Ces paramètres ne seront pas pris en compte dans ce livre et peuvent être trouvés dans les documents originaux.

Lors du test de la précision et de la répétabilité d'un mécanisme de robot, deux termes sont importants, à savoir le cluster et le barycentre du cluster. Le cluster est défini comme un ensemble de poses d'effecteur atteint, correspondant à la même pose de commande.

Le barycentre est un point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes des coordonnées x , y et z de tous les points du cluster. Les données de position et d'orientation mesurées doivent être exprimées dans un référentiel de coordonnées parallèle au référentiel de base.

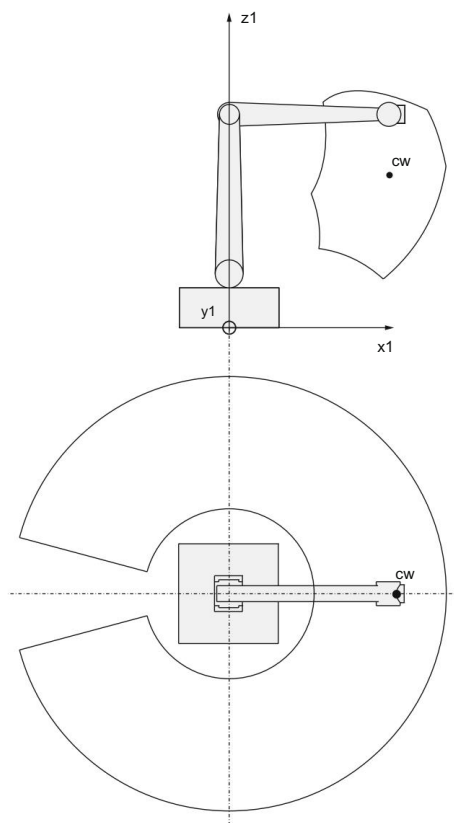


Fig. 15.4 Espace de travail du robot

Le point de mesure doit se situer aussi près que possible de l'origine du cadre d'interface mécanique. Des méthodes de mesure optique sans contact sont recommandées. Les instruments de mesure doivent être correctement calibrés. Les tests de précision et de répétabilité du robot doivent être effectués avec une charge maximale au niveau de l'effecteur et une vitesse maximale entre les points spécifiés.

La norme définit les poses qui doivent être testées. Les mesures doivent être effectuées en cinq points, situés dans un plan placé en diagonale à l'intérieur d'un cube (Fig. 15.7). La pose du cube dans l'espace de travail du robot est également spécifiée. Il doit être situé dans la partie de l'espace de travail où la plupart des activités du robot sont anticipées. Le cube doit avoir un volume maximal autorisé dans l'espace de travail du robot et ses bords doivent être parallèles au cadre de coordonnées de base. Le point P1 est situé à l'intersection des diagonales au centre du cube. Les points P2 – P5 sont situés à une distance des coins du cube égale à $10\% \pm 2\%$ de la longueur de la diagonale L. La norme détermine également le nombre minimum de cycles à effectuer lors du test de chaque paramètre caractéristique :

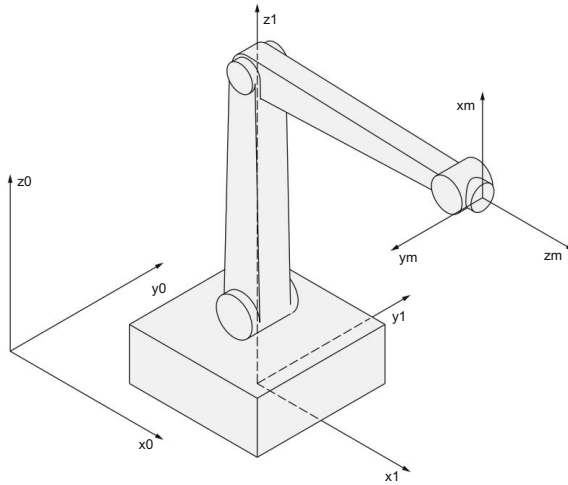


Fig. 15.5 Les cadres de coordonnées du robot manipulateur

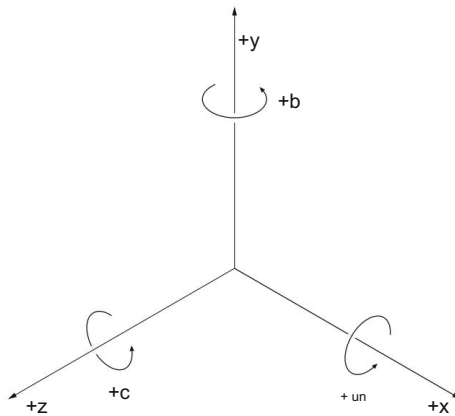


Fig. 15.6 Directions positives des déplacements de translation et de rotation

- précision et répétabilité de la pose : 30 cycles, •
- précision et répétabilité de la distance : 30 cycles, •
- temps de stabilisation de la pose : 3
- cycles, • dépassement de la
- pose : 3 cycles, • dérive de la précision et de la répétabilité de la pose : cyclage continu pendant 8 h.

Lors du test de la précision et de la répétabilité des poses de l'effecteur terminal, nous devons faire la distinction entre la pose dite de commande et la pose atteinte (Fig. 15.8).

La pose de commande est la pose souhaitée, spécifiée par la programmation du robot ou la saisie manuelle des coordonnées souhaitées à l'aide d'un pendentif d'apprentissage. La pose atteinte est la pose réellement atteinte de l'effecteur du robot en réponse à la commande

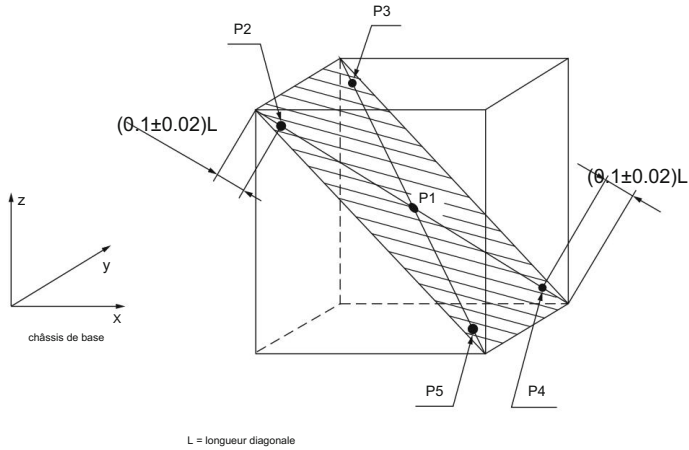


Fig. 15.7 Le cube avec les points à tester

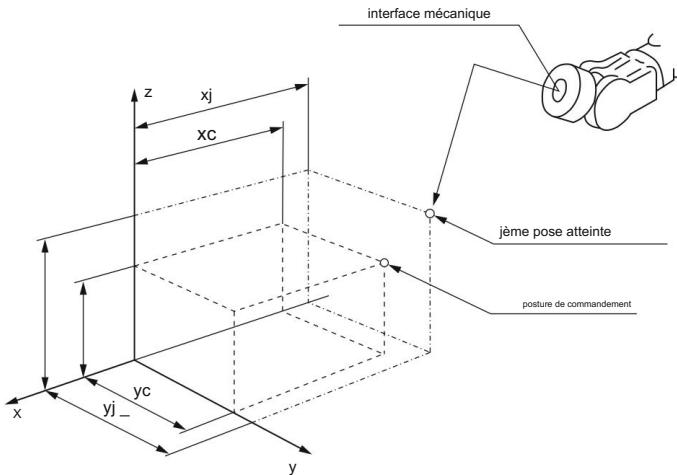


Fig. 15.8 La pose de commande et la pose de l'effecteur atteint

pose. La précision de la pose évalue les écarts qui se produisent entre la commande et la pose atteinte. La répétabilité de pose estime les fluctuations des poses atteintes pour une série de visites répétées à la même pose de commande. La précision et la répétabilité de la pose sont donc très similaires à la précision et à la répétabilité d'un tir répétitif sur une cible. Les raisons des écarts sont les suivantes : erreurs causées par l'algorithme de contrôle, erreurs de transformation des coordonnées, différences entre les dimensions de la structure mécanique du robot et le modèle de contrôle du robot, défauts mécaniques, tels que l'hystérésis ou le frottement, et influences externes telles que la température.

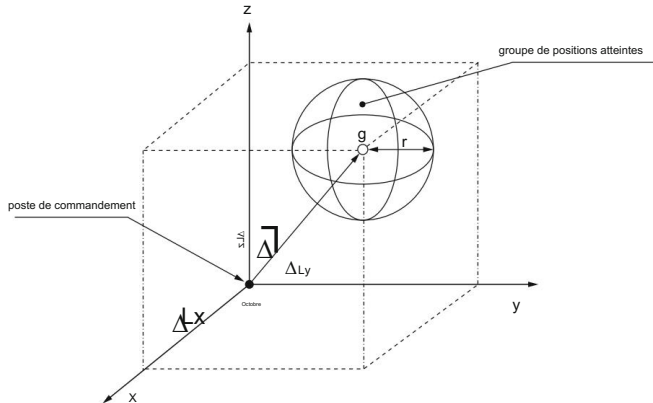


Fig. 15.9 La précision et la répétabilité de la position

La précision de pose est définie comme l'écart entre la pose de commande et la valeur moyenne des poses atteintes lorsque l'effecteur s'approchait de la pose de commande dans la même direction. La précision de position et d'orientation est traitée séparément. La précision de la position est déterminée par la distance entre la pose de commande et le barycentre du groupe de poses atteintes (Fig. 15.9). La précision de position $L = [L_x \ L_y \ L_z]$ est exprimée par l'équation suivante

$$L = \sqrt{(x^- - x_c)^2 + (y^- - y_c)^2 + (z^- - z_c)^2}, \quad (15.1)$$

où (x^-, y^-, z^-) sont les coordonnées du barycentre du cluster, obtenues en faisant la moyenne des 30 points de mesure, évalués lors de la répétition des mouvements dans la même pose de commande O_c avec les coordonnées (x_c, y_c, z_c) .

La précision d'orientation est la différence entre l'orientation angulaire commandée et la moyenne des orientations angulaires atteintes. Elle est exprimée séparément pour chaque axe du cadre de coordonnées de base. La précision d'orientation autour de l'axe z a la forme suivante

$$L_c = C^- - C_c, \quad (15.2)$$

où C^- est la valeur moyenne des angles d'orientation autour de l'axe z , obtenue en 30 mesures en essayant d'atteindre le même angle de commande C_c . Des équations similaires sont écrites pour la précision de l'orientation autour des axes x et y .

La norme définit aussi exactement le déroulement des mesures. Le robot part du point P_1 et se déplace vers les points P_5, P_4, P_3, P_2, P_1 . Chaque point est toujours atteint depuis la même direction

0 cycle	P1
1 ^{ère} cycle	P5 → P4 → P3 → P2 → P1 cycle
2 ^{ème} cycle	P5 → P4 → P3 → P2 → P1
	⋮
30 ^e cycle	P5 → P4 → P3 → P2 → P1

Pour chaque point, la précision de position L et les précisions d'orientation L_a , L_b et L_c sont calculées.

Pour la même série de mesures, la répétabilité de la pose doit également être déterminée. La répétabilité de pose exprime la proximité des positions et des orientations des 30 poses atteintes lors de la répétition des mouvements du robot dans la même pose de commande. La répétabilité de position (Fig. 15.9) est déterminée par le rayon de la sphère r dont le centre est le barycentre de l'amas. Le rayon est défini comme

$$r = D^- + 3SD. \quad (15.3)$$

Le calcul du rayon r selon Eq. (15.3) est expliqué plus en détail par les équations suivantes

$$D^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (15.4)$$

$$ET = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}{n-1}}.$$

Dans les équations ci-dessus, nous sélectionnons à nouveau $n = 30$, tandis que (x_j, y_j, z_j) sont les coordonnées de la j -ième position atteinte.

La répétabilité de l'orientation pour l'angle autour de l'axe z est présentée à la Fig. 15.10. La répétabilité d'orientation exprime la dispersion des 30 angles atteints autour de leur moyenne pour un même angle de commande. Il est décrit par les écarts-types triples. Pour l'angle autour de l'axe z , nous avons

$$RC = \pm 3Sc = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (C_j - \bar{C})^2}{n-1}}. \quad (15.5)$$

Dans l'éq. (15.5) C_j représente l'angle mesuré à la j ème pose atteinte. Le déroulement des mesures est le même que pour les tests de précision. Le rayon r et les écarts angulaires r_b et r_c sont calculés séparément pour chaque pose.

La précision et la répétabilité de la distance sont testées de la même manière. La précision de distance quantifie les écarts qui se produisent dans la distance entre deux positions de commande et deux ensembles de positions moyennes atteintes. La répétabilité de la distance

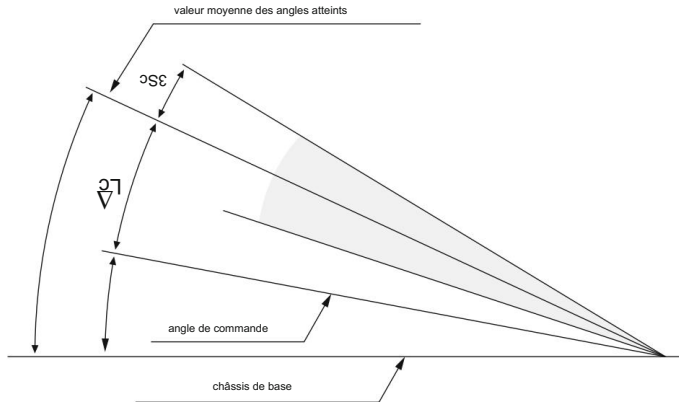


Fig. 15.10 La précision et la répétabilité de l'orientation

détermine les fluctuations des distances pour une série de mouvements répétés du robot entre deux points sélectionnés. La précision de la distance est définie comme l'écart entre la distance de commande et la moyenne des distances atteintes (Fig. 15.11). En supposant que P_{c1} et P_{c2} sont la paire de positions commandées et que P_{1j} et P_{2j} sont la jème paire parmi les 30 paires de positions atteintes, la précision de distance B est définie

$$B = D_c - D^- \quad (15.6)$$

où

$$D_c = P_{c1} - P_{c2} = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

$$D^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = P_{1j} - P_{2j} = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

Dans les équations ci-dessus décrivant la précision de la distance, $P_{c1} = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ et $P_{c2} = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ représentent la paire de positions souhaitées tandis que $P_{1j} = (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j})$ et $P_{2j} = (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j})$ sont le couple de positions atteintes. Le test de précision de distance est effectué à la charge maximale de l'effecteur du robot, qui doit être déplacé 30 fois entre les points P_2 et P_4 du cube de mesure. La répétabilité de distance RB est définie comme

$$RB = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}{n - 1}} \quad (15.7)$$

Considérons quatre autres paramètres caractéristiques qui devraient être testés dans des robots industriels se déplaçant d'un point à un autre. Le premier est la stabilisation de la pose

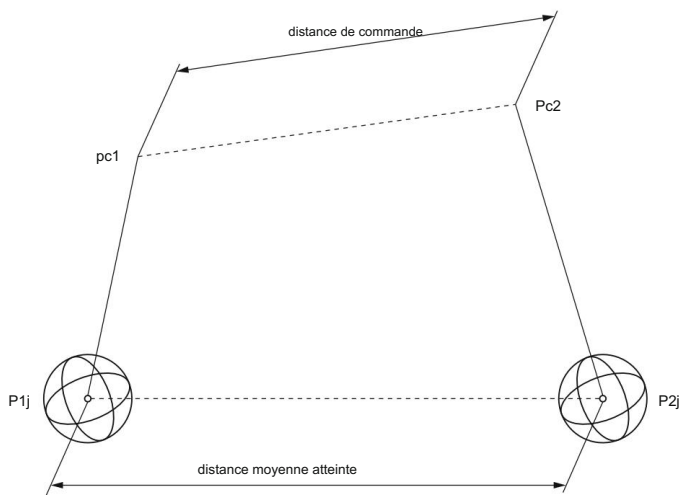


Fig. 15.11 Précision de la distance

temps. Le temps de stabilisation est l'intervalle de temps entre l'instant où le robot donne le signal de « pose atteinte » et l'instant où il est oscillant ou amorti le mouvement de l'effecteur terminal du robot se situe dans une limite spécifiée par le fabricant. La définition du temps de stabilisation de la pose est évidente sur la Fig. 15.12. L'épreuve est effectuée à une charge et à une vitesse maximales. Les cinq points de mesure sont visités en l'ordre suivant P1 → P2 → P3 → P4 → P5. Pour chaque pose, la valeur moyenne de trois cycles est calculé.

Un paramètre similaire est le dépassement de pose, également illustré à la Fig. 15.12. La posture le dépassement est l'écart maximal entre la trajectoire d'approche de l'effecteur final et la pose atteinte après que le robot a donné le signal « pose atteinte ». Dans la figure 15.12 un dépassement négatif est représenté dans le premier exemple et un dépassement positif dans le deuxième exemple. L'instant t = 0 est le moment où le signal "pose atteinte" a été livré. Les conditions de mesure sont les mêmes que lors du test de la stabilisation temps.

Les deux derniers paramètres à tester dans le robot manipulateur industriel se déplaçant d'un point à l'autre sont la dérive de la précision de la pose et la dérive de la répétabilité de la pose. La dérive de la précision de position L_{RD} est défini comme

$$L_{RD} = |L_{t=0} - L_{t=T}| , \tag{15.8}$$

où $L_{t=0}$ et $L_{t=T}$ sont les valeurs de précision de position au temps $t = 0$ et au temps $t = T$, respectivement. La dérive de la précision d'orientation L_{RDC} est égal à

$$L_{RDC} = L_{c,t=0} - L_{c,t=T} , \tag{15.9}$$

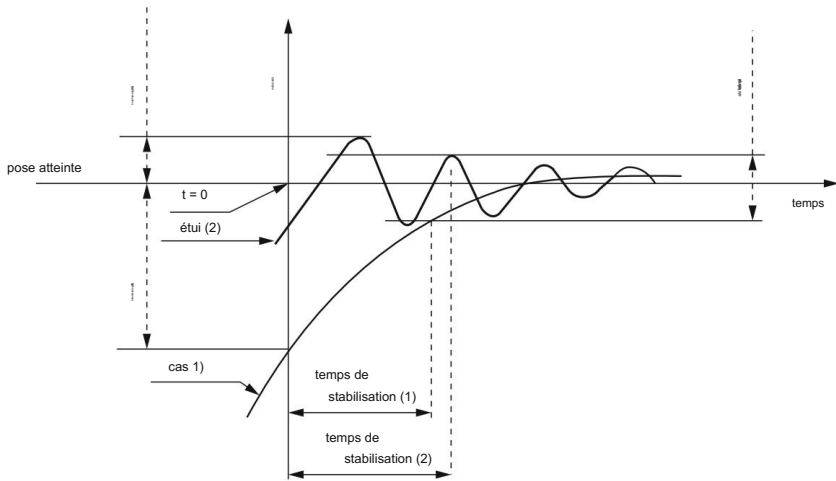


Fig. 15.12 Temps de stabilisation de pose et dépassement

où $L_{c,t=0}$ et $L_{c,t=T}$ sont les valeurs de précision d'orientation au temps $t = 0$ et au temps $t = T$, respectivement. La dérive de la répétabilité de position est définie par l'équation suivante

$$rDR = r_{t=0} - r_{t=T}, \quad (15.10)$$

où $r_{t=0}$ et $r_{t=T}$ sont les valeurs de répétabilité de position au temps $t = 0$ et au temps $t = T$, respectivement. La dérive de la répétabilité d'orientation est pour la rotation autour de l'axe z défini comme

$$rRDC = r_{c,t=0} - r_{c,t=T}, \quad (15.11)$$

où $r_{c,t=0}$ et $r_{c,t=T}$ sont les valeurs de répétabilité d'orientation au temps $t = 0$ et au temps $t = T$, respectivement. Les mesures sont effectuées à la charge et à la vitesse maximales du robot. Le robot se déplace cycliquement entre les points P4 et P2. Les mouvements cycliques durent huit heures. Les mesures ne sont prises qu'au point P4.

Annexe A

Dérivation de l'accélération en circulaire

Mouvement

Rappelons d'abord les définitions de vecteur position, vitesse et accélération d'une particule. Dans un cadre de référence donné (c'est-à-dire un système de coordonnées), la position d'une particule est donnée par un vecteur s'étendant de l'origine du cadre de coordonnées à la position instantanée de la particule. Ce vecteur pourrait être une fonction du temps, spécifiant ainsi la trajectoire des particules

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)). \quad (\text{A.1})$$

La vitesse de la particule est définie comme le changement de position par unité de temps

$$\mathbf{v} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{docteur}}}{t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (\text{A.2})$$

L'accélération est définie comme le changement de vitesse par unité de temps,

$$\mathbf{a} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{docteur}}}{t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \quad (\text{A.3})$$

Nous notons qu'il s'agit d'une équation vectorielle, de sorte que le changement de vitesse fait référence à la fois à un changement de l'amplitude de la vitesse et à un changement de direction de la vitesse.

Le mouvement circulaire est décrit par un vecteur tournant $\mathbf{r}(t)$ de longueur fixe, $|\mathbf{r}| = \text{constante}$. Le vecteur position est ainsi déterminé par le rayon du cercle r , et par l'angle $\theta(t)$ de $\mathbf{r}$ par rapport à l'axe x (Fig. A.1).

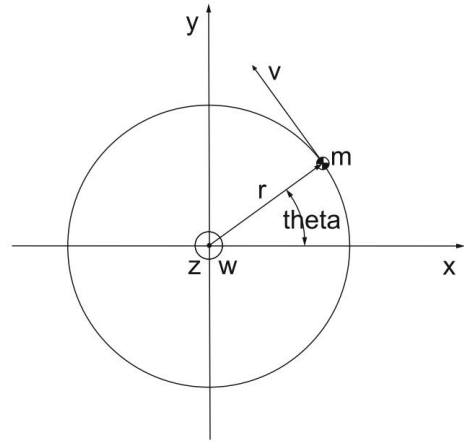
Introduisons maintenant un ensemble de trois vecteurs unitaires orthogonaux : $\mathbf{e}_r$ dans la direction de $\mathbf{r}$, et dans la direction de la tangente au cercle et $\mathbf{e}_z$ dans la direction de l'axe z . La relation entre les trois vecteurs unitaires est donnée par $\mathbf{e}_\theta = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_r$.

On définit le vecteur vitesse angulaire comme étant perpendiculaire au plan de la trajectoire circulaire d'amplitude égale à la dérivée temporelle de l'angle θ

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\theta} \mathbf{e}_z. \quad (\text{A.4})$$

Passons au calcul de la vitesse

Fig. A.1 Paramètres et variables en mouvement circulaire



$$\mathbf{v} = \frac{d\text{vecteur}}{dt} \quad (\text{A.5})$$

La direction de la vitesse est donnée par la tangente au cercle : $\mathbf{e}_t = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_r$.
L'amplitude de la vitesse est donnée par la longueur de l'arc de cercle infinitésimal $ds = r d\theta$ divisé par le temps infinitésimal dt , que la particule a besoin pour parcourir ce chemin

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} = r \dot{\theta} \quad (\text{A.6})$$

L'inclusion de la direction tangentielle de la vitesse donne

$$\mathbf{v} = r \dot{\theta} \mathbf{e}_t = \dot{\theta} \mathbf{e}_z \times \mathbf{r} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (\text{A.7})$$

Pour obtenir l'accélération, on calcule la dérivée temporelle de la vitesse

$$\mathbf{a} = \frac{D\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (\text{A.8})$$

On différencie le produit vectoriel comme on différencierait un produit normal de deux fonctions

$$\mathbf{a} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (\text{A.9})$$

Définir l'accélération angulaire $\boldsymbol{\alpha}$ comme la dérivée temporelle de la vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}$: $\boldsymbol{\alpha} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$, on voit que le premier terme correspond à l'accélération tangentielle

$$\mathbf{a}_t = \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r} \quad (\text{A.10})$$

Dans le deuxième terme, nous insérons l'expression de la vitesse

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}, \quad (\text{A.11})$$

et on obtient un double produit vectoriel $\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$. En utilisant l'identité $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$ de l'algèbre vectorielle et en notant que $\boldsymbol{\omega}$ et $\mathbf{r}$ sont orthogonaux, nous obtenons pour le deuxième terme de l'équation d'accélération

$$\boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = \boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r}) - \mathbf{r}(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\omega}) = -\omega^2 \mathbf{r}, \quad (\text{A.12})$$

qui est la composante radiale (ou centripète) de l'accélération. Nous avons donc finalement

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r} - \omega^2 \mathbf{r}. \quad (\text{A.13})$$

Lectures complémentaires

1. Bajd T, Mihelj M, Munić M (2013) Introduction to Robotics, Springer
2. Craig JJ (2005) Introduction to Robotics—Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall
3. Kajita S, Hirukawa H, Harada K, Yokoi K (2014) Introduction to Humanoid Robotics, Springer
4. Klančar G, Zdešar A, Blažič S, Škrjanc I (2017) Wheeled Mobile Robotics - From Fundamentals Towards Autonomous Systems, Elsevier
5. Lenarčič J, Bajd T, Stanišič MM (2013) Robot Mechanisms, Springer
6. Merlet JP (2006) Parallel Robots (Second Edition), Springer
7. Mihelj M, Podobnik J (2012) Haptique pour la Réalité Virtuelle et la Téléopération, Springer
8. Mihelj M, Novak D, Beguš S (2014) Technologie et application de réalité virtuelle, Springer
9. Natale C (2003) Interaction Control of Robot Manipulators, Springer
10. Nof SY (1999) Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons
11. Paul RP (1981) Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, La presse du MIT
12. Sciavico L, Siciliano B (2002) Modélisation et contrôle des robots manipulateurs, Springer
13. Spong MW, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) Modélisation et contrôle de robots, John Wiley et fils
14. Tsai LW (1999) Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons
15. Xie M (2003) Fundamentals of Robotics—Lier la perception à l'action, Monde Scientifique

Indice

UN

Accélération

- angulaire, 62, 244
- centripète, 62, 245
- radiale, 62, 245
- tangentielle, 62, 244

Accéléromètre, 94

Distance de

- précision, 239
- dérive, 233, 240
- orientation, 237
- pose, 233, 235
- position, 237

Actionneur

- flexible, série
- 175 élastique, 175
- rigidité variable, 175

Robot anthropomorphe, 6, 231

Application

- guidée à la main, 187
- Fenêtre de transfert, 185

Assemblée, 147

Point

- d'attraction, 222, 226

Véhicule guidé automatisé, 189

B

Rétroprojection, 110, 113, 114 basée sur un
modèle, 115

Équilibre, 210

Pare-chocs, 98

C

Appareil photo,

- 185 étalonnage, 114, 118

modèle d'étalonnage, 118

pointe d'étalonnage, 118

paramètres extrinsèques, 114

paramètres intrinsèques, 112

Robot cartésien, 231

Centre de masse (COM), 214, 215

Chaîne cinématique fermée, 69

Cobot, 9

Application

- collaborative, 185
- préhenseur,
- 184 fonctionnement,
- 173, 177 robot, 157, 173, 175,
- 184 espace de travail, 174, 186

Collision, 175

Conformité, 175

Contraintes, 71, 77

Contact

- quasi-statique, 182
- transitoire, 182

Capteur de contact, 96

Contrôle, 133

admission, 176

force, 133, 147, 149, 151

compensation de gravité, 136, 137, 144

impédance, 176

dynamique inverse, 137, 139, 144, 148,
152

jacobienne inverse, 143

orientation, 202

composition parallèle, 151

position, 133

position et orientation, 203

proportionnelle-dérivée, 135, 136, 144 couple,
176 jacobienne

transposée, 142

Convoyeur, 164

- à courroie, [165](#)
 - chaîne, [164](#)
 - chaîne métallique, [164](#)
 - rouleau, [165](#)
 - Bande transporteuse, [158](#)
 - Coopération, [173](#).
 - Base de cadre de
 - coordonnées, [231](#)
 - caméra, [109](#)
 - global, [189](#), [194](#), [200](#), [204](#), [206](#)
 - image, [109](#)
 - index, [111](#)
 - local, [191](#)
 - interface mécanique, [232](#)
 - référence, [23](#), [31](#)
 - robot, [208](#)
 - monde, [133](#), [231](#)
 - Coordonnées
 - externes, [49](#), [80](#), [133](#), [141](#), [145](#), [151](#), [152](#)
 - image, [111](#)
 - index, [110](#)
 - internes, [49](#), [133](#)
 - joint, [80](#)
 - Coriolis, [68](#) ans
 - Temps de cycle, [159](#)
 - Cylindre
 - pneumatique, [158](#)
 - Robot cylindrique, [231](#)
- D**
- Péril, [153](#)
 - Degrés de liberté, [5](#), [6](#), [210](#), [217](#)
 - Robot Delta, [69](#), [75](#)
 - Entraînement différentiel, [192](#)
 - Déplacement, [16](#)
 - Distance
 - de freinage, [180](#)
 - intrusion, [180](#)
 - séparation de protection, [180](#)
 - arrêt, [180](#)
 - Primitives dynamiques de mouvement (DMP), [221](#), [223](#)
 - estimation, [225](#)
 - modulation, [227](#)
 - Système dynamique
 - linéaire, [222](#)
- E**
- Pince électrique, [167](#)
 - Encodeur
 - magnétique, [92](#)
 - optique, [89](#)
 - Effecteur terminal, [133](#), [142](#), [149](#), [160](#)
 - Angles d'Euler, [39](#), [218](#)
 - Exosquelette, [2](#), [3](#)
 - passifs, [220](#)
- F**
- Évitement des pannes, [154](#)
 - Chargeur, [160](#)
 - chargeur, [163](#)
 - partie, [163](#)
 - vibrant, [163](#)
 - bol vibrant, [163](#)
 - vibrant en ligne, [164](#)
 - Dispositif d'alimentation, [160](#)
 - Ressort
 - de doigt, [167](#)
 - Luminaire, [160](#)
 - Force
 - de contact, [148](#), [149](#), [152](#)
 - réaction au sol, [211](#)
 - limitation, [177](#), [181](#)
 - magnétique, [170](#)
 - admissible, [183](#)
 - Capteur de force et de couple, [98](#)
 - Capteur de force, [98](#)
 - Terme forcé, [223](#)
 - Projection vers l'avant, [108](#), [114](#)
- G**
- Saisir
 - par la force, [167](#)
 - par la forme, [167](#)
 - fiable, [167](#)
 - Gravité, [68](#)
 - Pince, [39](#), [41](#), [46](#), [165](#)
 - électrique, [167](#)
 - hydraulique, [167](#)
 - magnétique, [169](#)
 - à plusieurs doigts, [166](#)
 - pneumatique, [167](#)
 - à deux doigts, [166](#)
 - vide, [168](#)
 - Dispositif de guidage, [178](#)
 - Soudage par points au pistolet, [171](#)
 - soudage, [171](#)
 - Gyroscope, [94](#)
- H**
- Guidage manuel, [177](#), [178](#), [220](#)
 - Robot haptique, [2](#)

Capture de mouvement humain, 217
Robot humanoïde, 3, 209, 210
Pince hydraulique, 167

je

Coordonnées de l'image, 111
Plan image, 109
Traitement d'images, 118
Apprentissage par imitation, 210, 216, 217
Inclinomètre, 94
Coordonnées de l'index, 110
Inertie, 68
Unité de mesure inertielle, 94, 96, 219
Centre de rotation instantané, 193
Fenêtre d'interface, 186

J

Capteur de couple articulaire, 101

K

Paire cinématique, 27
Cinématique, 49
 directe, 49, 51, 73, 80, 214
 inverse, 49, 51, 73, 80

L

Télémètre laser, 103
Lecteur laser, 104
Jambe, 70
LiDAR, 105
Fin de course, 98
Localisation, 189, 197
 guidage inductif, 197 laser,
 197 spot
 magnétique, 197 bande
 magnétique, 197 naturel,
 197 odométrie,
 199 radio, 199 fil,
 197

Locomotion

 bipède, 210, 211
 phase d'appui double, 213 phase
 d'appui simple, 213 phase
 d'appui, 213 phase
 d'oscillation, 213
 schéma de marche, 213

M

Machine

 indexation, 159
Aimant
 électroaimant, 169
 permanent, 170
Encodeur magnétique, 92
Pince magnétique, 169
Magnétomètre, 94

Transformation homogène de matrice, 11, 13, 16,
 20, 27
 Jacobien, 51, 55, 142–144, 148 rotation,
 13, 39, 42
Robot mobile, 1, 189, 191 chariot
 élevateur mobile, 189
 remorqueur,
 189 chargeur d'unité, 189
Modèle
 dynamique, 136, 138, 148, 176
 géométrique, 19, 24
 cinématique, 142
Surveillance de la vitesse et de la séparation, 177

N

Nanorobot, 1
Navigation, 189, 197

O

Évitement d'obstacles, 205
Odométrie, 199
Omnidirectionnel, 190
Opération
 collaborative, 173
Opérateur, 174
Codeur optique, 89
 absolu, 89
 incrémental, 91
Orientation, 6, 16, 39
Dépassement, 240
 poses, 233

P

Palette, 158–160
 moulée par injection, 161
 métal, 161
 formée sous vide, 161
Robot parallèle, 69, 73, 76, 80
Porte-partie, 159

Contrôle de chemin, 202
Suivre le chemin, 207
Planification de parcours, 189, 201

Équation matricielle de perspective, 110

Projection en perspective, 108, 110

Phase

 évolution, 228

 variable, 223, 228

Plate-forme, 70

Cylindre pneumatique, 158

Pince pneumatique, 167

Point

 final, 126, 129

 initial, 126, 129 via,

 126, 128, 129

Point à point, 123, 223, 226

Pose, 6, 16

 initiale, 23, 29, 31, 35

Position, 6, 16

Potentiomètre, 87

Pression

 autorisé, 183

Chaîne de production, 158

 asynchrone, 159 hybride,

 158 en ligne,

 158 rotative,

 158 synchrone,

 159

Programmation par démonstration, 210, 217

Projection

 vers l'arrière, 110, 113–115 vers

 l'avant, 108, 114

 perspective, 108, 110

Capteur de proximité, 102

Pompe

 à vide, 169

 Venturi, 169

Q

Quadricoptère, 2

Quaternion, 39, 44, 45

R

Capteur de télémétrie, 102

Réducteur, 86

Distance de

 répétabilité, 239

 dérive, 233, 240

 orientation, 238

 pose, 233, 235, 238

 position, 238

Robot-éthique, 3

Robot

 anthropomorphe, 6, 231

 cartésien, 231

 collaboratif, 9, 157, 173, 175, 184 cylindrique, 231

 Delta, 69, 75

 effecteur, 160

 environnement, 153

 haptique, 2

 humanoïde, 3, 209, 210

 industriel, 173, 174, 178 mobile,

 1, 189, 191 parallèle, 1,

 69, 73, 76, 80 réhabilitation, 2

 SCARA, 6, 22, 35, 231

 segment, 27

 souple,

 9 sphérique, 231

 système, 173

 système de vision, 160

Bras robotique, 4

Cellule robotisée, 6, 8, 153

Dynamique des robots, 60, 67

Pince robotisée, 4

Main de robot, 9

Robotique, 1

 humanoïde, 209

Articulation de robot,

 1, 4 prismatiques,

 4 tournantes,

 4 rotationnelles,

 4 translationnelles, 4

Robot manipulateur, 1, 4, 6, 7

Segments de robots, 1, 4

Véhicule robotique, 1

Vision robotique, 107

Poignet de robot, 4

Rotation, 6, 12, 16

Matrice de rotation, 13, 39, 42

Angles RPY, 39, 42, 134

S

Sécurité, 153–155

Danger pour la sécurité, 174

Robot SCARA, 6, 231

Sensation

 douleur, 182

Capteur, 2, 4, 85

 bumper, 98

 capacitif, 185

 contact, 96

 électrique, 85

 électromagnétique, 85

 extéroceptif, 85

force, [98](#), [185](#)
 force et couple, [98](#), [175](#)
 inclinomètre, [94](#)
 unité de mesure inertielle, [94](#) couple
 articulaire, [101](#), [175](#)
 télémètre laser, [103](#)
 scanner laser, [104](#)
 LiDAR, [105](#) fin
 de course, [98](#)
 encodeur magnétique, [92](#)
 optique, [86](#)
 encodeur optique, [89](#)
 potentiomètre, [87](#)
 proprioceptif, [85](#)
 proximité, [102](#)
 télémétrie, [102](#)
 sécurité, [176](#)
 tachymètre, [93](#)
 tactile, [96](#), [175](#), [185](#)
 télémètre ultrasonique, [102](#)
 Disque d'abstraction de capteur, [200](#)
 Localisation et cartographie simultanées
 (SLAM), [200](#)
 Robot sphérique, [231](#)
 Doigt à ressort, [167](#)
 Temps de stabilisation, [233](#), [240](#)
 Normes, [153](#)
 Statique, [54](#)
 Vision stéréo, [115](#)
 Plate-forme Stewart-Gough, [69](#), [74](#), [78](#), [82](#)
 Arrêt
 d'urgence, [178](#), [184](#)
 protection, [178–180](#)
 sécurité surveillée, [177–180](#), [182](#)
 Polygone de support, [211](#), [214](#)

J
 Cadran
 de table,
 [159](#) rotatif, [161](#)
 Tachymètre, [93](#)
 Capteur tactile, [96](#)
 capacitif, [97](#)
 basé sur la déformation, [97](#)
 magnétique, [98](#)
 mécanique, [98](#)
 optique, [97](#)
 piézoélectrique, [97](#)
 Télémanipulateur, [2](#), [3](#), [9](#)

Soudage
 au chalumeau, [171](#)
 Suivi
 optique, [217](#)
 Trajectoire, [123](#), [132](#)
 interpolation, [126](#), [129](#)
 planification, [123](#)
 Traduction, [5](#), [12](#), [16](#)
 Profil de vitesse trapézoïdal, [123](#), [126](#)

tu
 Télémètre à ultrasons, [102](#)
 Modèle de monocycle, [194](#)

V
 Variable
 rotationnel, [29](#)
 translationnel, [29](#)
 Environnement virtuel, [2](#)
 Robot
 visionnaire, [107](#)
 Système de vision, [158](#)

O
 Marche
 dynamique, [215](#)
 statique, [215](#)
 Roue, [190](#)
 roulette, [190](#)
 fixe, [190](#)
 sphérique, [190](#)
 direction standard, [190](#)
 Suédois, [190](#)
 Zone de travail, [58](#)
 Espace de travail, [6](#), [55](#), [153](#),
 [231](#) collaboratif, [174](#), [186](#)
 adroit, [59](#)
 maximum, [174](#)
 opérationnel, [174](#)
 joignable, [59](#)
 restreint, [174](#)
 Capteur de poignet, [98](#)

Z
 Point de moment zéro (ZMP), [210](#), [211](#), [214](#)