

La nouvelle robotique : vers une approche centrée sur l'humain

Machines

Stefan Schaal¹

¹Informatique et neurosciences, Université de Californie du Sud, 3710 S. McClintock Avenue—RTH 401, Los Angeles, Californie 90089-2905 et ATR Computational Neuroscience Laboratories, 2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02

Reçu le 26 décembre 2006 ; accepté le 21 mai 2007 ; publié en ligne le 16 juillet 2007)

La recherche en robotique s'est éloignée de son orientation première vers l'industrie applications. La nouvelle robotique est une vision qui a été développée au cours des dernières années par notre propre université et de nombreuses autres recherches nationales et internationales institutions et aborde la manière dont de plus en plus de robots ressemblant à des humains peuvent vivre parmi nous et assumer des tâches là où notre société actuelle présente des lacunes. Aîné soins, physiothérapie, éducation des enfants, recherche et sauvetage et général l'assistance dans les situations de la vie quotidienne sont quelques-uns des exemples qui bénéficieront de la nouvelle robotique dans un avenir proche. Avec ces objectifs à l'esprit, la recherche pour le La nouvelle robotique doit adopter une large approche interdisciplinaire, allant de les questions mathématiques traditionnelles de la robotique aux nouvelles questions de psychologie, neurosciences et éthique. Cet article présente certaines des recherches importantes problèmes qui devront être résolus pour faire de la nouvelle robotique une réalité.

[DOI : 10.2976/1.2748612]

CORRESPONDANCE

Stefan Schaal : sschaal@usc.edu

En 1921, la pièce de Karel Capek, *Rossum's Universal Robots*, largement considérée comme le début de l'ère de la robotique [par exemple, [Sciavicco et Siciliano](#) (1996)] – ont fourni deux visions intéressantes. Premièrement, les robots ressemblaient à des humains, et deuxièmement, ils interagissaient avec les humains d'une manière naturelle, c'est-à-dire semblable à celle des humains. Pendant plus d'un demi-siècle après la conception d'un robot par Capek, les réalisations était loin derrière ses idées : les robots étaient appareils mécaniques minimalistes, loin d'atteindre un niveau général semblable à celui d'un humain performance, et il y avait essentiellement aucune interaction entre les humains et les robots, à l'exception du code téléchargé par un programmeur. Bien sûr, tout cela a fait sens, car les robots étaient simplement utilisés pour tâches de positionnement très répétitives et de haute précision dans l'industrie. Et c'est dans ce domaine que, jusqu'à présent, les robots ont fait une différence et contribué à des moyens utiles au progrès de la technologie et de la productivité industrielle.

Le début du 21^{ème} siècle, cependant, nous avons été témoins d'un remarquable

changement dans l'orientation de la recherche sur les robotiques. Comme l'a initié l'intelligence artificielle dans les années 1980 et 1990, il Il y a toujours eu un grand intérêt pour la création de machines robotiques plus générales et plus intelligentes. Comme il y avait peu d'application pour de tels robots dans l'industrie – c'est-à-dire que les robots industriels à usage spécifique sont difficiles à battre en termes de productivité dans la tâche pour laquelle ils ont été conçus – travailler sur des robots intelligents était initialement largement confinée à la recherche universitaire et à quelques recherches uniques programmes comme l'exploration spatiale, l'exploration sous-marine, etc. Avec les progrès des technologies de l'information et conception mécanique, cependant, Capek vision d'un être humain, autonome et les robots interactifs sont progressivement devenus à la portée des prototypes de recherche. À la fin des années 1990, un nouveau domaine de la robotique est devenue saillante, humanoïde la robotique, principalement grâce à des innovations travailler à l'Université Waseda, Sarcos Inc., et la Honda Corporation [par exemple, pour un aperçu, voir [Menzel et D'Alusio](#)

Revue HFSP

(2000)]. Dans ces lieux, les premiers robots humanoïdes à corps entier ont été construits et présentés à la communauté des chercheurs et presse populaire. La série Wabian d'études humaines de l'Université Waseda robots principalement axés sur les compétences de marche des bipèdes, comme l'a fait le robot Asmio de Hon da, qui, en raison de son association avec un très grande entreprise et son aspect très raffiné, a reçu beaucoup d'attention partout dans le monde. L'humanoïde Sarcos robot «DB» axé sur les compétences de manipulation autonomes, parmi dix associées à des capacités d'apprentissage dérivées de idées issues des neurosciences computationnelles (Atkeson et al., 2000). Il existe désormais de nombreux robots humanoïdes, principalement en Asie et au Japon notamment, mais aussi en Europe et dans les pays NOUS. Depuis l'an 2000, il existe même une conférence spécialisée consacrée à la robotique humanoïde, la IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robotics.

Outre le défi scientifique de longue date consistant à comprendre le fonctionnement du cerveau humain et à créer un Système artificiel doté de capacités similaires à celles des humains, y a-t-il une réelle utilité à avoir des robots humanoïdes ? Depuis du point de vue de la fabrication traditionnelle dans l'industrie, la réponse serait probablement négative, car le rapport coût/bénéfice des robots humanoïdes est - jusqu'à présent et dans un avenir moyen - assez peu attrayant. Mais l'industrie traditionnelle n'est probablement pas sur quoi la nouvelle robotique va avoir un impact. Les robots humains et similaires feront plutôt partie de notre vie normale, c'est-à-dire ils assumeront des fonctions dans notre société là où il y a tout simplement trop peu d'humains pour faire face aux besoins sociétaux. Cette question a été reconnue et mise en avant par de nombreux pays. dans le monde, souvent déclenchée par la tendance à l'augmentation de la proportion de personnes âgées dans la société et aux conséquences qui y sont associées. risque d'une future pénurie de soins adéquats. Cependant, il existe de nombreux autres domaines dans lesquels les robots peuvent être utiles. Le travail dans des environnements dangereux et les missions de recherche et de sauvetage après une catastrophe comptent parmi les problèmes les plus fréquemment mentionnés. Les robots peuvent également agir comme physiothérapeutes pour aider les patients à faire de l'exercice correctement et à retrouver la motricité perdue fonctions - par exemple, le manque de physiothérapeutes offre aux patients victimes d'un AVC aux États-Unis seulement 40 minutes environ de repos. formation par jour, alors qu'environ 6 ha par jour seraient nécessaires dans le période post-AVC immédiate pour retrouver les fonctions motrices (Taub et Wolf, 1997 ; van der Lee et coll., 1999 ; Loup et Blanton, 1999) - ne serait-il pas bien si l'on pouvait « examiner » un robot un physiothérapeute de la pharmacie locale ? Bien sûr, les robots pourraient aider à atteindre, transporter et manipuler des objets pour les personnes en convalescence et handicapées. le sujet est souvent abordé sous le nom de robotique personnelle ou la robotique d'assistance. Ces robots peuvent également assumer des fonctions de mentorat et cognitives, comme rappeler aux gens de prendre leurs médicaments à temps, ou pour ne pas oublier les autres rendez-vous programmés activités. Il existe également des opportunités intéressantes pour les robots dans l'éducation et la vie quotidienne des enfants. Par exemple, les enfants autistes semblent réagir très positivement aux programmes éducatifs jeux avec des robots (par exemple, Robins et al., 2005). Et des robots pourraient également devenir des camarades de jeu et des aides éducatives dans



Figure 1. Croquis d'artiste de l'implication future des robots dans la société : „a... robots d'assistance, „b... robots compagnons de jeu chez l'enfant l'éducation, „c... des robots pour le mentorat et l'assistance dans les tâches de manipulation, „d... des robots qui enseignent des exercices de mouvement, „e... des robots personnels pour les personnes âgées, „f... des robots pour la surveillance et la protection des enfants et des adultes.

des scénarios scolaires tels que les enfants deviennent et restent intéressés par l'enseignement supérieur en sciences et technologies. Beaucoup d'autres scénarios pourraient être énumérés ici (Fig. 1 fournit un croquis d'artiste de certaines de ces idées.

Il est important de souligner que la nouvelle robotique sera centrée sur l'humain¹. , c'est-à-dire que les robots travailleront avec hu l'homme dans un environnement humain normal. Et c'est dans ce rôle de robots d'assistance que de nombreux composants nouveaux et interdisciplinaires font partie de la recherche en robotique. Par exemple, si un robot est censé être accepté par les enfants et les adultes, il doit adhérer à certains comportements et normes sociaux qui nous, en tant qu'humains, trouvons acceptable. Ainsi, la psychologie et l'éthique de l'interaction homme-robot doivent être explorées. Si un robot doit agir en tant que physiothérapeute, il doit intégrer des connaissances sur les déficiences neuronales et musculo-squelettiques d'un patient, et adapter les exercices et suggestions d'améliorations en conséquence. Essentiellement, tel un robot doit avoir une certaine connaissance du fonctionnement du cerveau humain contrôle le mouvement et comment les déficiences neuronales, dues par exemple à accident vasculaire cérébral, affectent les capacités de mouvement d'un patient. Ou, si un robot est censé travailler dans un environnement humain avec le mêmes objets et outils que les humains utilisent dans la vie quotidienne, il peut s'agir bénéfique pour comprendre comment les humains accomplissent leurs tâches motrices compétences et comment le répertoire des compétences humaines est structuré. Ainsi,

¹Il existe également des ateliers dédiés à la robotique centrée sur l'humain qui ont été récemment lancé, par exemple l'Atelier international sur la robotique centrée sur l'humain.

des roboticiens, traditionnellement profondément ancrés dans les mathématiques appliquées, la mécanique, la théorie du contrôle et la théorie de l'optimisation, sont soudainement confrontés à une multitude de nouveaux sujets allant de la psychologie, de la biologie et des neurosciences à l'éthique. Le La nouvelle robotique nécessitera un nouveau type de scientifique capable parcourir un très large éventail de disciplines différentes.

La figure 2 est une tentative de structurer les sujets de recherche dans ce domaine.

une nouvelle robotique centrée sur l'humain en trois grandes catégories : (i) l'action, (ii) l'interaction et (iii) l'engagement. Recherche-action s'intéresse principalement aux questions de contrôle moteur dans les deux les humains et les robots. La recherche sur les interactions met l'accent sur l'interaction entre les humains et les robots, c'est-à-dire la recherche fondamentale sur les comment deux systèmes peuvent agir ensemble pour accomplir un objectif - à une extrémité, cela signifie qu'un système, par exemple, le humain, indique à l'autre système, le robot, quoi faire. À à l'autre extrême, les deux systèmes pourraient travailler ensemble pour atteindre un objectif, par exemple en portant ensemble un objet lourd. Enfin, la recherche sur l'engagement examine les aspects cognitifs et composantes psychologiques de la robotique centrée sur l'humain. Naturellement, la structure suggérée sur la figure 2 n'est pas nette, c'est-à-dire il existe de nombreux chevauchements entre la recherche sur l'action, l'interaction et l'engagement. La liste des sujets de recherche présentée dans la figure 2 n'est pas non plus exhaustive. Mais dans le but de donner une perspective sur l'avenir de la recherche en robotique et afin de

En passant en revue quelques publications récentes pertinentes, la figure 2 fournit des lignes directrices utiles pour les prochaines sections de cet article. Cela devrait Il convient de noter que plusieurs autres perspectives sur l'avenir de la robotique peuvent être trouvées dans la littérature (par exemple, [Khatib et al., 2004](#) ; [Brock et coll., 2005](#)).

RECHERCHE-ACTION

La recherche-action repose sur la théorie du contrôle moteur, qui a été largement développé dans des domaines d'ingénierie classiques comme cybernétique ([Wiener, 1948](#)), contrôle optimal ([Bellman, 1957](#)) et la théorie du contrôle ([Slotine et Li, 1991](#) ; [Narendra et Annaswamy, 2005](#)). Ces domaines abordaient de nombreux aspects cruciaux problèmes de systèmes de mouvement, y compris les commentaires négatifs

contrôle, contrôle anticipatif, contrôle non linéaire, mouvement planification avec critères d'optimisation, stabilité, contrôle avec système temporisé, contrôle adaptatif, contrôle stochastique, estimation de l'état, contrôle des suractionnements et des sous-actionnements systèmes, etc. La figure 3 illustre un schéma de contrôle classique pour le contrôle moteur qui met en évidence les différentes étapes d'un circuit de contrôle, chacune d'entre elles étant associée à un grand nombre de sujets de recherche. Beaucoup de ces sujets ont reçu de nombreux attention dans la recherche en robotique, à tel point qu'ils sont devenus connaissances des manuels scolaires (par exemple, [Russell et Norvig, 1995](#) ; [Scia Vicco et Siciliano, 2000](#)). Plusieurs questions méritent cependant attention particulière. Il convient de noter qu'une grande quantité de la recherche en contrôle moteur biologique se concentre sur des sujets similaires à ceux de la figure 3 ([Sabes, 2000](#) ; [Schaal et Schweighofer, 2005](#) ; [Shadmehr et Wise, 2005](#)).

PRIMITIVES MOTEURS ET BIBLIOTHÈQUES MOTEURS

Alors que des problèmes tels que les transformations de coordonnées et le moteur la génération de commandes en robotique (Fig. 3) sont désormais assez bien comprises (par exemple, [Sciavicco et Siciliano, 2000](#)), elles compter sur quelqu'un qui fournit au robot un plan approprié de quoi faire. Dans de nombreux projets de robotique, cette partie est prise par un concepteur humain qui crée manuellement le plan de un comportement particulier. Bien que cette approche soit très efficace dans les environnements statiques, la nouvelle robotique est intrinsèquement sur les robots agissant dans des environnements humains normaux, c'est-à-dire dynamiques. Ainsi, la question se pose de savoir comment créer des contrôle et planification de moteurs réactifs. Le plus souvent, une réponse est recherchée en créant une boîte à outils de mouvements élémentaires qui, en séquence ou en superposition, créent un spectre suffisamment large de capacités motrices complexes. Nous appelons tel les mouvements élémentaires sont des primitives motrices, mais dans la littérature, ils ont également été désignés par schémas, comportements de base, options, macros, etc. (pour une revue, voir [Mataric, 1998](#) ; [Schaal, 1999](#) ; [Schaal et al., 2003](#)).

On peut distinguer au moins deux grandes tendances en matière de recherche sur les primitives de mouvement. Premièrement, les primitives de mouvement peuvent être

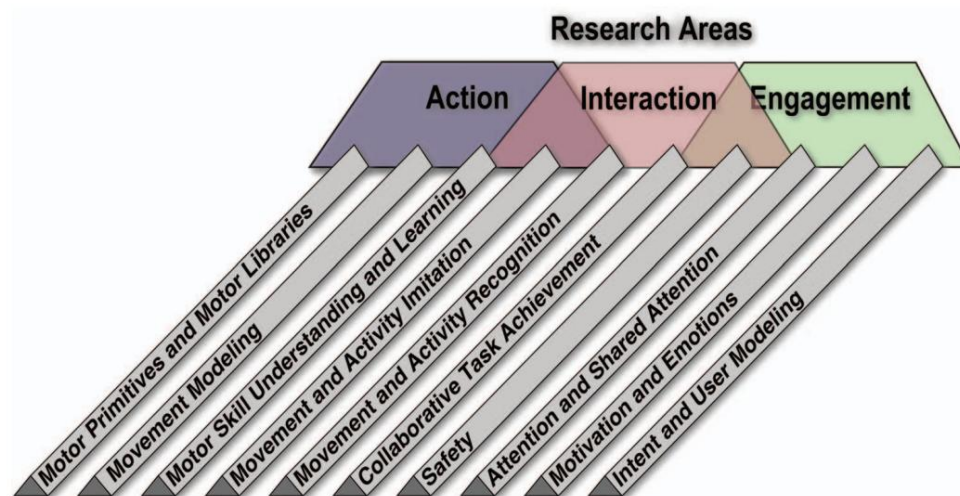


Figure 2. Thèmes de recherche en robotique centrée sur l'humain.

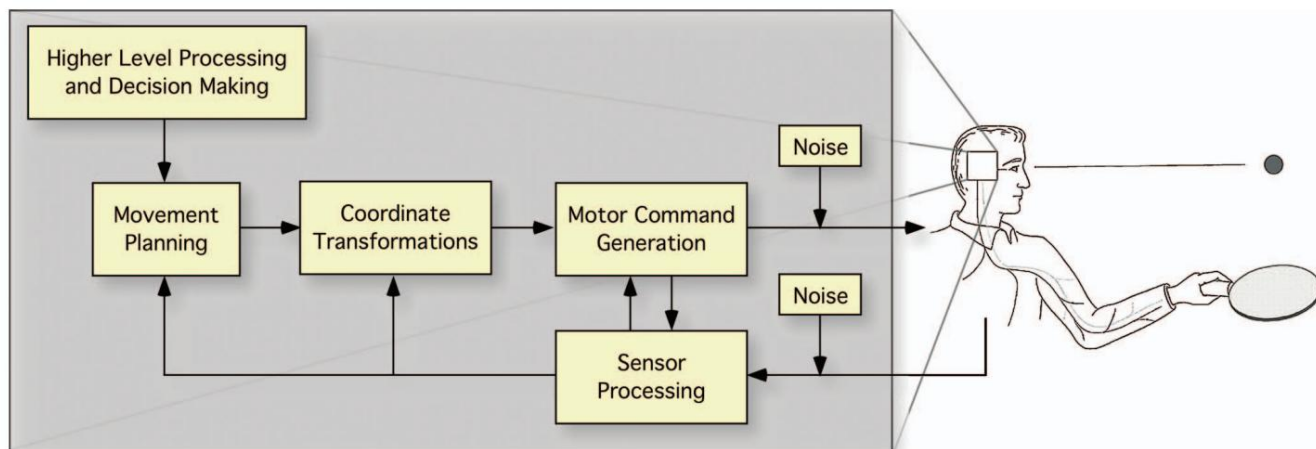


Figure 3. Croquis d'un diagramme de contrôle générique généralement utilisé dans la recherche en robotique.

modélisé comme des systèmes dynamiques, comme les attracteurs ponctuels et les limites cycles (par exemple [Bullock et Grossberg, 1988](#); [Burridge et al., 1999](#); [Schaal et coll., 2004](#); [Righetti et Ijspeert, 2006](#)). Le

L'approche systémique dynamique permet d'aborder de manière naturelle diverses questions importantes liées aux mouvements de type humain, par exemple : problèmes de stabilité, couplage perception-action, évitement d'obstacles avec des champs potentiels, etc. Fréquemment, les systèmes dynamiques les primitives motrices sont facilement interprétées comme des unités comportementales, par exemple, atteindre une cible, la locomotion du bipède, etc. Comme inconvénient, la modélisation avec des équations différentielles non linéaires est souvent assez complexe et pas toujours traitable analytiquement.

La deuxième approche majeure des primitives de mouvement consiste à au moyen de techniques statistiques (par exemple, [Atkeson et al., 2000](#); [Haruno et coll., 2001](#); [Doya et coll., 2002](#); [Jenkins, 2003](#); [Ina mura et al., 2004](#)). Comme avantage, les méthodes statistiques offrent outils et mécanismes bien compris pour extraire le mouvement modules à partir de données empiriques, tels que les primitives de mouvement peut être fondé sur des enregistrements comportementaux d'humains. Comme un désavantage, il semble que le mouvement extrait statistiquement les primitives n'ont souvent pas de signification comportementale, comme qu'il n'est pas clair dans quelle mesure ces primitives de mouvement se généralisent à de nouveaux comportements. De plus, les phénomènes tels que le couplage perception-action, l'évitement d'obstacles, etc., ne sont pas naturellement inclus dans les modèles statistiques de primitives de mouvement.

Jusqu'à présent, les implémentations complètes d'une approche primitive du mouvement font défaut, et il est difficile de privilégier objectivement une approche plutôt qu'une autre.

MODÉLISATION DU MOUVEMENT

Afin d'opérer dans des environnements conçus pour les humains, il est souvent avantageux pour les robots d'employer des stratégies de mouvement en tant qu'humains. De plus, si les robots bougent comme les humains, les humains les acceptent plus facilement comme partenaires en raison de notre adaptation inhérente au mouvement d'apparence naturelle ([Johansson, 1973](#); [Viviani et Schneider, 1991](#); [Viviani et al., 1997](#)). Il faut donc se poser la question de savoir quels principes (ou modèles) les humains utilisent dans la génération du mouvement, et quels sont les principes (ou modèles) utilisés par les humains pour générer le mouvement.

quelles sont les stratégies sous-jacentes à la motricité humaine.

Ces questions sont difficiles, car elles ont été abordées par le domaine de la psychologie comportementale pour le contrôle moteur et le contrôle neuromoteur depuis plusieurs décennies (par exemple, voir [Schmidt, 1988](#); [Arbib, 1995a](#); [Arbib, 1995b](#); [Shadmehr et Wise, 2005](#)) et des conclusions définitives manquent encore.

Il est cependant possible de souligner plusieurs caractéristiques du mouvement humain, en particulier, si ces caractéristiques sont largement absentes dans les systèmes robotiques. L'une d'entre elles est que la génération de mouvements humains est hautement conforme, alors que la plupart (même modernes) les robots utilisent un contrôle plutôt rigide (à gain élevé). La raison pour laquelle les roboticiens privilégient le contrôle à gain élevé est qu'il réduit le besoin de modèles précis du robot et de son environnement.

environnement. Le contrôle à gain élevé signifie simplement que la position et erreurs de vitesse entre une trajectoire souhaitée et une trajectoire réalisée sont multipliés par un grand nombre, et ces résultats sont alors ajoutés aux commandes du moteur. Ainsi, de petits écarts par rapport le mouvement souhaité entraîne de fortes commandes correctives du moteur, c'est-à-dire que le robot se sent très raide. Le problème avec la raideur le contrôle est que toute perturbation imprévue est combattue avec effort très élevé, potentiellement si élevé que soit le robot lui-même de l'environnement pourrait être endommagé. Les humains et les animaux, d'autre part, cèdent doucement à la perturbation, et ainsi éviter de nuire à l'environnement (qui peut être un autre être humain) ou à eux-mêmes. Sachant que dans un environnement dynamique les collisions avec l'environnement sont inévitables, conformes le contrôle semble être crucial pour la Nouvelle Robotique.

Une alternative au contrôle à gain élevé est le contrôle à faible gain avec des modèles feedforward ([An et al., 1988](#); [Miall et Wolpert, 1996](#); [Kawato, 1999](#)), c'est-à-dire des modèles de dynamique des robot qui prend en charge la prédiction de la commande moteur optimale pour n'importe quelle position, vitesse et accélération des degrés du robot de liberté. En théorie, les spécifications de conception d'un robot permettent de générer ces modèles avec assez de précision. Mais dans la pratique, les modèles théoriques et la dynamique réelle du robot des dix ne correspondent pas, en raison de la dynamique complexe des actionneurs, des fils, flexibles, coques de protection, etc. sur le robot. Ainsi, un faible gain

Le contrôle basé sur des modèles sur des robots complexes de type humain est en fait assez difficile et fait toujours l'objet de recherches en cours (Vijaya kumar et Schaal, 2000 ; Vijayakumar et al., 2005). Le sujet devient encore plus complexe si l'on prend en compte la dynamique d'interaction entre un robot et son environnement.

Chaque système de marche, par exemple, présente ces dynamiques d'interaction dues aux forces de réaction du sol. Les interactions avec l'environnement créent des contraintes, et les mathématiques du contrôle basé sur un modèle deviennent beaucoup plus complexes.

complexe (Peters et al., 2005a; Nakanishi et al. soumis). Comme en conséquence, le contrôle conforme des robots de type humain a à peine atteint, ni théoriquement ni expérimentalement (pour quelques exceptions, voir Albu-Schäffer et al., 2007), et, potentiellement, beaucoup de choses peuvent être apprises du mouvement humain études (Gomi et Kawato, 1996 ; Franklin et al., 2003 ; Osu et al., 2004) et les propriétés du système musculo-squelettique humain (Brown et al., 1999 ; Brown et Loeb, 1999 ; Loeb, 2001).

Une autre caractéristique fascinante du contrôle moteur humain est que la plupart du temps, nous accomplissons plusieurs tâches en parallèle, par exemple, se tenir en équilibre sur deux pieds et saisir un objet. La théorie de la robotique a développé des méthodes de priorisation hiérarchique des tâches (Nakamura, 1991 ; Khatib et al., 2004 ; Sentis et Khatib, 2004 ; Arimoto et coll., 2005 ; Peters et al., 2005b) , en théorie, ils sont assez attrayants et capables. Dans des travaux récents, Sentis et Khatib (Khatib et al., 2002 ; Khatib et al., 2004 ; Sentis et Khatib, 2004) ont démontré qu'il était plutôt naturel des comportements de recherche pourraient être générés avec des contrôleurs et des hiérarchies d'espace de tâches appropriés. Cependant, la plupart des méthodes s'appuient sur des modèles précis du robot et deviennent assez complexe lorsque le robot est en contact avec l'environnement, notamment lorsque les conditions de contact changent (comme dans locomotion ou manipulation d'objets). Il existe assez peu d'évaluations expérimentales du contrôle hiérarchique des tâches sur des systèmes robotiques et les études comportementales avec les humains ont à peine abordé des problèmes aussi complexes.

COMPRÉHENSION ET APPRENTISSAGE DE LA MOTRICITÉ

Il reste encore beaucoup à comprendre sur la façon de représenter les habiletés motrices. Il existe généralement un choix quant à savoir si une tâche spéciale coordonnées, les coordonnées externes générales (par exemple, les coordonnées cartésiennes) ou les coordonnées internes (angle d'articulation) sont les plus approprié (Saltzman, 1979; Schaal et al., 1992). Des stratégies de contrôle spéciales peuvent rendre les habiletés motrices plus faciles ou plus difficiles (par exemple, Beek, 1989 ; Schaal et al., 1992). Il existe quelques idées sur la façon de générer des représentations génériques de la motricité (Wada et Kawato, 1995 ; Miyamoto et coll., 1996 ; Miyamoto et Kawato, 1998 ; Ijspeert et al., 2003), mais jusqu'à présent, il manque une approche générique de l'acquisition de compétences.

Un autre élément important dans la compréhension du moteur compétences réside dans la représentation de l'objectif de la tâche, c'est-à-dire une sorte de métrique qui mesure la réalisation des tâches. Pour certaines tâches, comme atteindre un objet, c'est aussi simple que la métrique de le succès est simplement la distance entre la main et l'objet.

Pour d'autres tâches, par exemple la locomotion bipède, la tâche l'objectif est beaucoup plus abstrait et difficilement quantifiable. Pour locomotion du bipède, l'objectif principal de la tâche est de ne pas tomber, mais un objectif secondaire est de conserver l'énergie, un objectif tertiaire l'objectif de la tâche est de réduire l'usure du système moteur, et un autre objectif de la tâche pourrait être de maintenir l'équilibre tout en cherchant simultanément une tasse de café. L'objectif de s'équilibrer n'est pas facilement quantifiable : on pourrait choisir la position souhaitée du centre de gravité, mais aussi une position souhaitée du centre de gravité. point de moment zéro (Kajita et Tani, 1996). D'autres chercheurs peuvent affirmer que de telles mesures ne conviennent pas à la locomotion humaine comme celle des bipèdes et recourir à la description de la locomotion du bipède en termes de mesure de stabilité de la locomotion associée. cycle limite (McGeer, 1990; Collins et al., 2005). Essentiellement, spécifier des critères d'optimisation spécifiques à une tâche n'est pas facile.

Si nous supposons que nous avons une représentation des tâches et une métrique pour mesurer la réussite d'une tâche, on ne sait toujours pas comment choisir commandes motrices appropriées pour accomplir la tâche. Les perspectives d'un concepteur humain sont une possibilité, mais comme mentionné précédemment, la nouvelle robotique nécessitera des robots capables de réagir à des environnements dynamiques, et il est peu probable que l'homme les concepteurs peuvent prévoir tous les événements possibles auxquels un robot sera confronté exposé à. Ainsi, des robots apprenants seraient très souhaitables, un domaine appelé contrôle de l'apprentissage. Il est utile d'en suivre un des cadres les plus généraux de contrôle de l'apprentissage tels qu'ils ont été initialement développés au milieu du XXe siècle dans les domaines de la théorie de l'optimisation, du contrôle optimal et en particulier de la programmation dynamique (Bellman, 1957 ; Dyer et McRey nolds, 1970). Ici, l'objectif de l'apprentissage du contrôle a été formalisé comme la nécessité d'acquérir une politique de contrôle dépendante des tâches. qui mappe le vecteur d'état à valeur continue x d'un contrôle système et son environnement, éventuellement dans un délai dépendant manière, à un vecteur de contrôle à valeur continue u :

$$u = x,,t. \tag{1}$$

Le vecteur de paramètres contient les paramètres spécifiques au problème dans la politique • qui doivent être ajustés par l'apprentissage. système. Puisque le système contrôlé peut généralement être exprimé comme une fonction non linéaire

$$x' = f_{x,u} \tag{2}$$

conformément à la théorie standard des systèmes dynamiques (Stro Gatz, 1994), la dynamique combinée du système et du contrôleur aboutir à

$$x' = f_{x,x,t,.} \tag{3}$$

Ainsi, apprendre le contrôle signifie trouver un (généralement non linéaire) fonction • qui est adéquate pour un comportement souhaité donné et système de mouvement.

Une approche générale des politiques de contrôle de l'apprentissage est l'apprentissage par renforcement (Sutton et Barto, 1998 ; Schaal, 2002 ; Barto et Mahadevan, 2003). Malheureusement, le renforcement l'apprentissage est une technique plutôt lente, avec d'énormes problèmes informatiques et théoriques lorsqu'il s'agit d'appliquer

Revue HFSP

aux robots réels ([Peters et al., 2003a](#) ; [Peters et al., 2003b](#) ; [Peters et coll., 2005c](#)). Alternativement, on peut choisir de postuler apprendre seulement certaines parties du problème de contrôle, par exemple, comme dans apprendre les modèles internes nécessaires en feedforward contrôle. De telles tâches peuvent être réalisées grâce à un apprentissage supervisé techniques, ce qui est informatiquement et pratiquement beaucoup plus maniable ([Atkeson et al., 1986](#); [Schaal et Atkeson, 1994](#) ; [Atkeson et al., 1997a](#); [Atkeson et al., 1997b](#); [Schaal et al., 2002](#) ; [Peters et Schaal, 2006](#)). Malheureusement, l'apprentissage appliquée aux robots de type humain n'a été étudiée que dans un dans une mesure plutôt limitée, et un grand nombre de recherches à la fois sur l'aspect théorique et pratique de l'apprentissage automatique et de la robotique reste à faire (pour une revue, voir [Schaal, 2002](#) ; [Schaal, sous presse](#)).

RECHERCHE SUR LES INTERACTIONS

La recherche sur les interactions ajoute un élément intéressant aux circuits robotiques, à savoir comment coordonner deux systèmes de mouvement pour coopérer sur le même objectif de tâche. Bien entendu, cette coopération n'est pas contraint à une coopération mécanique mais autorise tout type d'interaction, par exemple, langage, gestes, etc. Interaction La recherche a récemment lancé son propre domaine de recherche et des conférences associées : l'interaction homme-robot (HRI). Pour illustrer la complexité de l'HRI, nous pourrions tenter de la définir similaire au terme « interaction homme-machine : »

L'HRI est le lieu où les humains et les robots sont engagés dans une expérience de réponse affectant mutuellement. En technique termes, nous avons (au moins) des politiques de contrôle doubles, l'un travaillant sur un humain, l'autre sur un robot

Le problème ici est que HRI couple au moins deux systèmes dynamiques. L'un d'eux, le robot, se porte peut-être plutôt bien compris. L'autre, l'humain, est moins bien compris, et même au risque d'être blessé si HRI tourne mal. En général, il est bien entendu que la dynamique non linéaire couplée les systèmes peuvent se comporter de manière prévisible ou imprévisible, hautement manière complexe ([Strogatz, 1994](#)). Ainsi, la recherche doit être plutôt prudent dans la conception des méthodes d'HRI, en gardant toujours en gardant à l'esprit que des algorithmes simples et bien compris dans l'isolation peut causer des dommages lorsqu'elle est couplée à plusieurs systèmes. Autrement dit, les préoccupations en matière d'éthique et de sécurité sont très importantes. en HRI, ainsi qu'une solide compréhension de la dynamique de l'action et la perception humaines, et quels stimuli ou comportements pourrait déclencher des situations dangereuses pour l'humain, par exemple des convulsions dues à une stimulation perceptuelle, des réactions émotionnelles ou réactions physiques inappropriées.

IMITATION DE MOUVEMENTS ET D'ACTIVITÉS

L'apprentissage culturel et par imitation comptent parmi les éléments les plus fascinants de l'être humain et sont souvent considérés comme la pierre angulaire de la manière dont les humains peuvent développer un niveau d'intelligence aussi élevé (voir les critiques dans Piaget, 1951 ; Tomasello et al. , [1993](#) ; [Meltzoff et Moore, 1994](#) ; [Byrne et Russon, 1998](#) ; [Rizzolatti et Arbib, 1998](#) ; [Dautenhahn et Nehaniv, 2002](#)). Depuis plus de 20 ans, les roboticiens tentent d'ajouter des imita

apprentissage de la tition, ou apprentissage par démonstration comme on l'appellait dans un premier temps, au répertoire de l'apprentissage des robots. L'imitation du mouvement est familière à tout le monde par l'expérience quotidienne : un enseignant démontre un mouvement, et immédiatement l'élève est capable de le répéter approximativement. Du point de vue de l'apprentissage, une démonstration de l'enseignant comme point de départ de son propre apprentissage peut accélérer considérablement l'apprentissage processus, car l'imitation réduit généralement considérablement la quantité d'essais et d'erreurs nécessaires pour accomplir le mouvement objectif en fournissant un bon exemple d'un mouvement réussi ([Schaal, 1999](#)). Ainsi, d'un point de vue robotique, il est important de comprendre les principes détaillés, les algorithmes et métriques qui soutiennent l'imitation, depuis la perception visuelle de l'enseignant jusqu'à l'émission de commandes motrices qui bouger les membres de l'élève.

La figure 4 présente les principaux ingrédients d'une approche conceptuelle. système d'apprentissage par imitation [pour une revue de nombreux articles connexes, voir [Schaal \(1999\)](#)]. Les informations sensorielles visuelles doivent être analysé en informations sur les objets et leur emplacement spatial dans un système de coordonnées interne ou externe ; l'organisation représentée est largement inspirée de la dorsale (quoi) et ventral (où) tel que découvert en neuroscientifique recherche ([van Essen et Maunsell, 1983](#)). En conséquence, certains forme d'information posturale du mouvement de l'enseignant et/ou des informations sur l'objet tridimensionnel concernant l'objet manipulé (si un objet est impliqué) devraient devenir disponible. Par la suite, l'une des questions majeures tourne sur la manière dont ces informations peuvent être converties en actions.

A cet effet, la figure 4 fait allusion à la notion de mouvement primitives, ce qui a déjà été discuté ci-dessus. En général, on pense à des primitives de mouvement pour coder des temporels complets comportements, comme « saisir une tasse », « marcher », « un service de tennis », etc. La figure 4 suppose que l'action perçue de l'enseignant est mappé sur un ensemble de primitives existantes dans une assimilation phase, également suggérée dans [Demiris et Hayes \(2002\)](#) et ([Wolpert et al., soumis](#)). Ce processus de cartographie nécessite également résoudre le problème de correspondance concernant une inadéquation entre le corps enseignant et le corps des élèves ([Dautenhahn et Nehaniv, 2002](#)). Par la suite, les primitives les plus appropriées sont ajustées en apprenant à améliorer la performance dans une phase d'accommodation. La figure 4 indique un tel processus en mettant en évidence les primitives les mieux adaptées avec des largeurs de lignes croissantes. Si aucune primitive existante n'est une bonne correspond au comportement observé, une nouvelle primitive doit être généré. Après une première phase d'imitation, l'auto-amélioration, par exemple à l'aide d'un système basé sur le renforcement critère d'évaluation de la performance ([Sutton et Barto, 1998](#)), peut affiner à la fois les primitives de mouvement et une étape supposée de génération de commande moteur (voir ci-dessous) jusqu'à ce que niveau de performance motrice est atteint (par exemple, [Peters et al., 2003a](#) ; [Bentivegna et al., 2004a](#)).

L'apprentissage par imitation nécessite un niveau élevé de compétences motrices et perceptuelles, dont aucune n'a encore été réalisée dans les systèmes robotiques. Néanmoins, le domaine de l'imitation dans

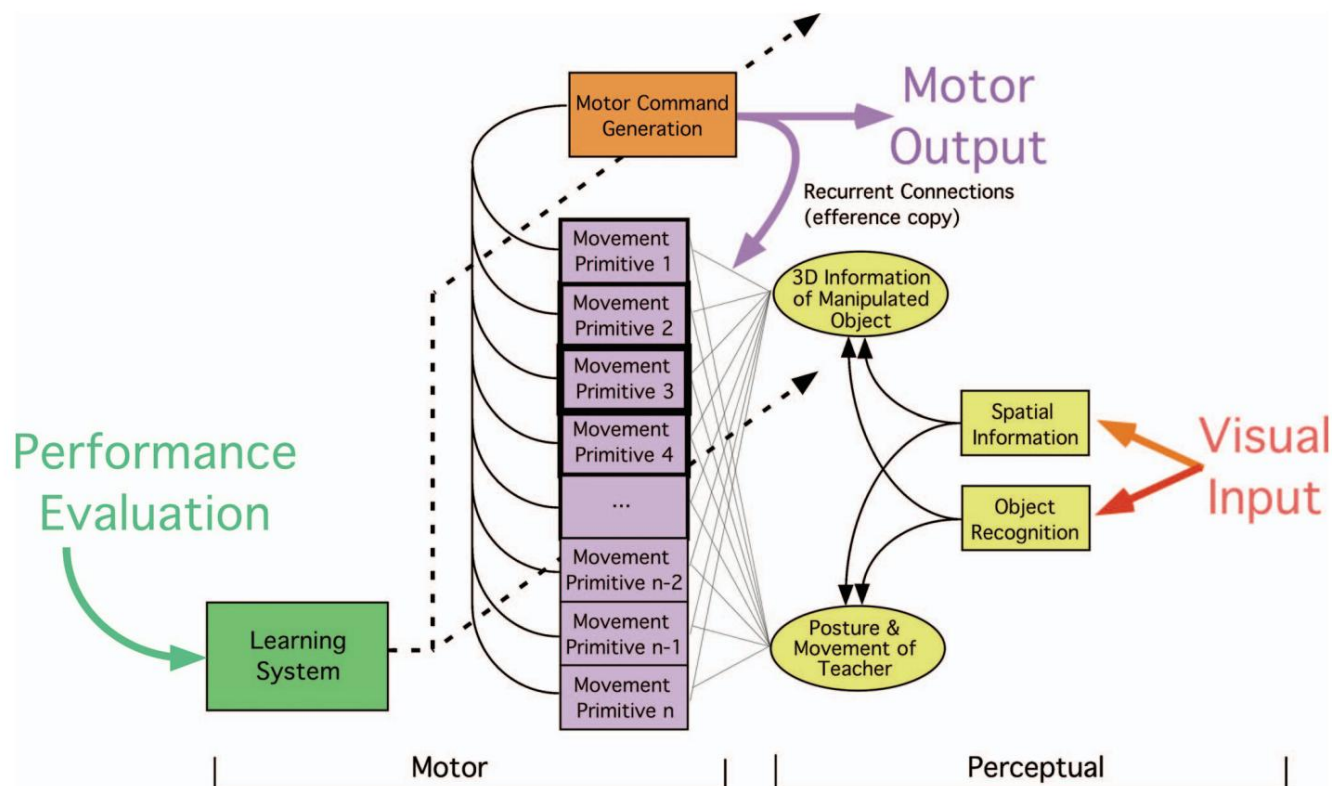


Figure 4. Esquisse conceptuelle d'un système d'apprentissage par imitation. Le côté droit de la figure contient principalement des éléments perceptuels et indique comment les informations visuelles sont transformées en informations spatiales et objets. Le côté gauche se concentre sur les éléments moteurs, illustrant comment un ensemble de primitives de mouvement est en compétition pour un comportement démontré. Les commandes du moteur sont générées à partir de l'entrée du moteur le plus approprié. L'apprentissage peut ajuster à la fois les primitives de mouvement et le générateur de commandes du moteur.

la robotique a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dix dernières années, et d'excellentes revues et collections papier existent (par exemple, [Schaal, 1999](#) ; [Mataric, 2000](#) ; [Dautenhahn et Nehaniv, 2002](#) ; [Schaal et coll., Arbib, 2006](#)).

RECONNAISSANCE DE MOUVEMENTS ET D'ACTIVITÉS

Comprendre le mouvement et l'activité humains sera un élément important de la nouvelle robotique, car les robots auront besoin de de déduire et de réagir de manière autonome au contexte de ce qui se passe autour d'eux. Ainsi, détecter les humains dans l'environnement et reconnaître qui ils sont et ce qu'ils font sera crucial. Même si la plupart des recherches connexes ont pour origine vision par ordinateur (par exemple, pour les critiques, voir [Gavrila, 1997](#) ; [Aggarwal et Cai, 1999](#)) et dépasse le cadre de cet article, du point de vue de la génération de mouvement, un potentiel L'inconvénient de ces approches est que les représentations utilisées pour la reconnaissance sont pour la plupart inappropriées pour le contrôle des mouvement, car ils ne concernent pas la notion d'articulations, muscles, couples articulaires ou objectifs de tâche. Étant donné que les robots du La nouvelle robotique ne sera pas seulement utilisée pour la surveillance, mais nous avons plutôt besoin d'agir en fonction de ce qu'ils ont perçu, par exemple, comme dans l'imitation du mouvement ou la thérapie physique, nous avons besoin d'être orientés vers l'action. perception plutôt que perception isolée.

Déclenché par la découverte des « neurones miroirs » en neuro

recherche biologique, c'est-à-dire certains neurones situés au interface de perception et d'action chez l'homme et le singe ([Rizzolatti et Arbib, 1998](#) ; [Schaal, 1999](#) ; [Frith et Wolpert, 2004](#) ; [Arbib, 2006](#)), et qui semblent effectivement impliqués dans perception orientée vers l'action, plusieurs projets de recherche en robotique et dans des domaines connexes ont été lancés pour développer des théories et des algorithmes correspondants. C'est-à-dire le moteur modulaire l'approche de contrôle de [Wolpert et Kawato \(1998\)](#), l'approche de systèmes dynamiques d'[Ijspeert et al. \(Ijspeert et coll., 2003\)](#), et l'approche statistique d'[Inamura et al. \(Inamura et al., 2004\)](#) et [Jenkins \(Jenkins, 2003\)](#) sont toutes des méthodes qui effectuent une perception orientée vers l'action et peuvent être appliquées à la robotique. Il convient cependant de souligner que la perception dans ces approches est généralement simplifiée, c'est-à-dire que la les auteurs n'utilisent pas d'entrées vidéo brutes pour la reconnaissance des mouvements, mais équipent plutôt leurs sujets de marqueurs ou d'autres signifie réduire la complexité du traitement visuel. Ainsi, il reste encore beaucoup à faire pour parvenir à une perception orientée vers l'action dans des environnements véritablement naturels.

RÉALISATION DE TÂCHES COLLABORATRICES

Dans certaines situations, il sera utile si plusieurs robots, ou robots et humains collaborent pour atteindre un objectif particulier. Il existe deux types de collaboration : la collaboration

Revue HFSP

au moyen d'un contact physique (par exemple, en portant conjointement un objet) et d'une collaboration uniquement au moyen du partage d'informations (par exemple, comme dans le cas de plusieurs robots cartographiant un environnement). Le Ce dernier domaine a reçu beaucoup d'attention ces dernières années en raison de la compétition RoboCup, c'est-à-dire des robots mobiles jouant au football en équipe (voir par exemple [Bredenfeld et al., 2006](#)), et il y a aussi une conférence technique sur le multi-robot systèmes (par exemple, voir [Parker et al., 2005](#)). Bon nombre des techniques développées dans ce domaine de recherche auront une incidence sur la nouvelle robotique, mais en élargissant cet article à ce domaine réduirait notre focalisation sur les approches interdisciplinaires centrées sur l'humain. trop de recherches.

Collaboration physique de robots (ou de robots et d'humains) est largement abordé sous le nom de contrôle de force en robotique, car la somme des forces agissant sur un objet manipulé conjointement est la plus centrale pour le comportement de l'objet. Un cadre théoriquement très attrayant pour une telle manipulation était développé par Khatib ([Khatib, 1987](#)), initialement dans le but de expliquant comment la force pourrait être la variable la plus cruciale dans codage des tâches motrices (contrairement à la position, à la vitesse ou à l'accélération). Dans [Featherstone et Khatib \(1997\)](#), il a été réalisé que le cadre de Khatib sur le contrôle au niveau des tâches basé sur la force (c'est-à-dire le contrôle opérationnel de l'espace) était très approprié pour la réalisation de tâches collaboratives, car la formulation spéciale de Khatib évite les interactions mathématiques complexes entre les systèmes moteurs collaborateurs, c'est-à-dire que chaque système peut apporter individuellement sa contribution de force sans prendre la compte de l'état combiné de tous les systèmes moteurs participants. La formulation du contrôle des tâches par Khatib reste donc une C'est l'une des approches théoriques les plus attrayantes pour la génération de capacités motrices robotiques, car elle combine la capacité de contrôle conforme, de contrôle hiérarchique et même de coordination multi-robots. Comme mentionné précédemment, le seul inconvénient est que ces propriétés nécessitent des modèles assez précis du robot système. Il sera intéressant de voir dans les travaux futurs si le contrôle moteur humain peut être démontré comme fonctionnant selon principes similaires à ceux suggérés par les travaux de Khatib, et certains des travaux dans ce sens sont en cours ([Scholz et Schoner, 1999](#) ; [Todorov et Jordan, 2002](#) ; [Todorov, 2005](#)).

SÉCURITÉ

Bien que ce document n'aborde pas les questions techniques de sécurité dans la Nouvelle Robotique, il est néanmoins important de souligner que la sécurité sera une préoccupation majeure et un obstacle au développement de la nouvelle robotique. Il est inévitable qu'il y ait Il y aura des accidents entre humains et robots dans un environnement robotique centré sur l'humain. Le robot peut ne pas se déclencher de tels problèmes, mais qui pourra empêcher les humains de pousser accidentellement les robots, les enfants grimpent dessus, etc.? Les moyens les plus efficaces pour réduire le risque de blessures est grâce à une conception de robot légère et conforme (par exemple, [Zinn et al., 2004](#)), et en adoptant des comportements de récupération similaires à ce que nous, les humains, faisons (par exemple, [Fujiwara et al., 2002](#)).

RECHERCHE SUR L'ENGAGEMENT

Quand on regarde un robot industriel assembler une voiture, on peut être fasciné par la technologie pendant un moment, mais après quelques répétitions, cet intérêt s'estompe. La recherche sur l'engagement tente de comprendre ce qu'il faut pour maintenir l'intérêt des humains lorsqu'ils interagissent avec un robot, ce qui sera crucial dans la nouvelle robotique lorsque les robots deviendront des éducateurs, des physiothérapeutes, des assistants personnels ou même des animaux de compagnie. Recherche sur l'engagement est le moindre d'un sujet de robotique original et bien plus encore ancré dans la psychologie et les sciences cognitives. Dans ce document, nous nous concentrerons donc uniquement sur quelques questions de recherche en engagement qui relèvent le plus fortement de la recherche technique. de la robotique.

ATTENTION ET ATTENTION PARTAGÉE

Les mouvements oculaires sont cruciaux dans le comportement humain dans au moins deux façons. Premièrement, nous les utilisons pour déplacer notre attention vers un objet d'intérêt, de telle sorte qu'il puisse être inspecté avec le région fovéale à haute résolution de la rétine, et deuxièmement, nous utiliser nos yeux pour informer les autres sur des objets intéressants, c'est-à-dire nous partageons l'attention et suscitons l'engagement. De plus, le le système oculomoteur humain a plusieurs comportements de niveau inférieur qui soutiennent la stabilisation de l'entrée visuelle (le réflexe vestibulo-oculaire, le réflexe opto-cinétique, la poursuite en douceur et vergence, par exemple voir [Shibata et al., 2001](#)). Enfin, les mouvements oculaires semblent être un élément important dans la création de séquences motrices complexes ([Flanagan et Johansson, 2003](#) ; [Flanagan et al., 2006](#)), de telle sorte que la génération d'actions séquentielles peut nécessiter de comprendre les principes de l'attention visuelle et la planification dans l'espace visuel.

Du point de vue de la robotique, il y a eu une bonne progression de travaux sur la création de comportements moteurs de bas niveau de la vision têtes (par exemple, [Demiris et al., 1997](#) ; [Breazeal et al., 2001](#) ; [Shi bata et al., 2001](#) ; [Panerai et al., 2003](#) ; [Aryananda et Weber, 2004](#)). Jusqu'à présent, cependant, une mise en œuvre complète de toutes les Les comportements oculomoteurs du système oculomoteur humain sont manquant. Tant que les têtes de robot étaient montées sur des plates-formes statiques, un système oculomoteur complet n'était souvent pas vraiment nécessaire, mais si la tête est censée être sur une plate-forme mobile robot humanoïde, tous les réflexes de stabilisation et comportements moteurs de plus haut niveau seront requis. Ce n'est pas l'un des ces comportements en soi constituent un problème technique, mais plutôt le Le défi réside dans la combinaison et l'arbitrage de tous les comportements et de certaines capacités d'apprentissage requises pour régler le paramètres comportementaux ([Shibata et al., 2001](#)).

L'attention visuelle avec les têtes de vision des robots a également été étudiée de manière approfondie (par exemple, [Braun, 1994](#) ; [Driscoll et al., 1998](#) ; [Breazeal et coll., 2001](#) ; [Shibata et coll., 2001](#) ; [Vijayakumar et al., 2001](#)), mais ce n'est que récemment qu'une étude assez complète Le système d'attention visuelle destiné aux applications techniques est issu des connaissances de la neurobiologie ([Koch et Ullman, 1985](#) ; [Itti et Koch, 2000a](#) ; [Itti et Koch, 2000b](#) ; [Itti et Koch, 2001](#) ; [Itti et al., 2003](#)). Ce travail est actuellement en cours

manière d'explorer comment l'intention (c'est-à-dire les biais descendants pertinents pour la tâche) peut influencer l'attention et la prise de décision (Navalpakkam et Itti, 2005 ; Carmi et Itti, 2006).

Enfin, une attention partagée, essentielle à l'engagement recherche, a commencé à être exploré dans certains projets de robotique (Kozima et Ito, 1998 ; Scassellati, 1998 ; Scassellati, 2002). Les capacités requises pour surveiller l'attention incluent le regard suivi, interprétation de la posture, reconnaissance des expressions faciales, etc. (par exemple, Breazeal et Scassellati, 2002). Il faudra une quantité importante de recherche et de développements technologiques jusqu'à ce que de tels systèmes soient bien compris, comparables dans leurs capacités à la performance humaine et pratiques dans environnements du monde réel.

MODÉLISATION D'INTENTION ET D'UTILISATEUR

Une question difficile et plutôt inexplorée concernant l'interaction homme-robot est de savoir comment extraire l'intention et les préférences de mouvement d'un corps donné. Si nous avons compris ces enjeux, il convient des protocoles pourraient être développés dans le cadre de l'interaction et de l'engagement des recherches qui séduisent les utilisateurs individuels et tiennent compte de leurs préférences individuelles. Plutôt peu de recherches des projets peuvent être trouvés qui se rapportent à ces questions. Un premier La première étape pourrait être de comprendre le mouvement et l'activité humains dans termes de fonctions de coût, c'est-à-dire associer un coût particulier fonctionner avec un comportement particulier. Apprentissage par renforcement génère des politiques de contrôle basées sur de telles fonctions de coût et déduire la fonction de coût d'une politique donnée (c'est-à-dire un comportement) pourrait être appelé apprentissage par renforcement inverse (Ng et Russell, 2000). Alternativement, des statistiques comportementales peuvent être collectées à partir du comportement observé, qui caractérise ensuite certaines préférences d'utilisateur et de mouvement (Bentivegna et al., 2004b ; Billard et al., 2004). De nombreux travaux de recherche sont nécessaires à faire pour trouver des approches réalisables sur le sujet et l'intention et la modélisation utilisateur, qui tente essentiellement d'approcher le sujet d'une « théorie de l'esprit » de manière algorithmique (Gallese et Goldman, 1998 ; Scassellati, 2002 ; Wolpert et al., 2003).

MOTIVATION ET ÉMOTIONS

La question de la modélisation des intentions et des utilisateurs est étroitement liée à comment comprendre la motivation et les émotions des humains dans une manière automatique et, bien sûr, comment créer des comportements de robot dans la Nouvelle Robotique qui se rapportent aux caractéristiques des personnalités humaines. Jusqu'à présent, il existe des méthodes empiriques et exploratoires travailler dans la communauté robotique sur ce sujet (par exemple, Breazeal et Scassellati, 2002 ; Kanda et coll., 2004 ; Coradeschi et coll., 2006), généralement en confrontant des sujets humains à certains forme de robot ressemblant à un humain et en étudiant leur réaction selon certaines mesures psychologiques. Une nouvelle approche intéressante consiste à examiner les bases neuroscientifiques de la motivation et les émotions, étudiées dans le contexte de la formation et de l'engagement. Recherche sur la formation et l'engagement part de l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage moteur lui-même peut générer des récompenses internes. Plus précisément, il est proposé que le système nerveux calcule le taux d'apprentissage des capacités motrices,

qui sert de récompense interne et s'ajoute aux conditions de récompense externes.

Selon un modèle préliminaire (Daw et Touretzky, 2002 ; Schweighofer et Doya, 2003 ; Schweighofer et al., 2004), la motivation à apprendre dépendra de la équilibre entre les succès, les échecs et les récompenses externes. Dans En particulier, la difficulté du mouvement à apprendre observé est cruciale. Si c'est trop facile ou trop difficile, le taux d'apprentissage deviendra bientôt nul. Ainsi, seulement modéré et décroissant les erreurs d'apprentissage produiront un gain élevé en termes de rétroaction positive boucle qui maximisera la motivation à apprendre. Ces intuitions peuvent être formalisées dans des programmes de formation et peuvent conduire à des méthodes qui maintiennent l'engagement optimal des étudiants pour un apprentissage rapide. Une méthodologie de recherche similaire pourrait être applicable à d'autres situations dans lesquelles la motivation et les émotions humaines jouent des rôles importants.

CONCLUSIONS

Cette perspective a mis en lumière une recherche interdisciplinaire programme qui pourrait ouvrir la voie à une nouvelle robotique. La vision est que, dans un avenir proche, les robots être omniprésents parmi nous et nous aider à accomplir nos tâches de manière une société de plus en plus complexe, une société de plus en plus confrontés au vieillissement de la population, aux problèmes d'éducation, aux catastrophes, aux maladies, etc. Pour fonctionner parmi nous, les robots de la Nouvelle Robotique auront besoin de beaucoup plus de ressources. capacités humaines dans leurs comportements moteurs, et ils le feront il faut également avoir des comportements sociaux appropriés. Ainsi, la recherche en robotique doit adopter une nouvelle approche interdisciplinaire programme allant des sujets techniques traditionnels de contrôle jusqu'aux neurosciences, à la psychologie, aux sciences cognitives et à l'éthique. Cet article s'est concentré sur l'introduction d'une approche non exhaustive manière – une certaine structure des sujets de recherche potentiels dans le Nouvelle robotique. Certains de ces sujets, par exemple ceux mentionnés dans le cadre de la Recherche-Action, disposent déjà d'une base scientifique plus solide. et sont en passe de mener des études pilotes sur de vrais robots. D'autres sujets, en particulier ceux énumérés dans la section Recherche sur l'engagement, en sont plutôt à leurs balbutiements et c'est le tâche de recherche pour savoir quelles sont les bonnes questions à poser demandez-vous et quelles approches pourraient être prometteuses. Dans certaines En un sens, la Nouvelle Robotique n'est rien d'autre que le vieux rêve de l'intelligence artificielle visant à créer un système artificiel avec des caractéristiques similaires. capacités que celles des humains. C'est juste que les moyens et les approches sur ce sujet ont considérablement changé des idées classiques du raisonnement symbolique et, dans le à la suite de l'amélioration de la technologie informatique et des connaissances sur le cerveau humain, recherchent plutôt des méthodes d'apprentissage statistique, neurosciences computationnelles et psychologie computationnelle. Il est également important que les ambitions de la Nouvelle Robotique sont réduits : ils peuvent réellement se concentrer sur les besoins sociétaux et faire progrès dans des domaines problématiques bien définis, par exemple, la physique robotique thérapie ou éducation robotique pour les enfants ayant des besoins spéciaux (par exemple, les enfants autistes), plutôt que d'essayer de créer un système robotique omnipotentiel pour tous les problèmes. Dans beaucoup de pays, les agences de recherche ont commencé à financer les plants du

Revue HFSP

La nouvelle robotique, et il sera passionnant d'assister au développement de ce nouveau domaine au cours de la prochaine décennie.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été financée en partie par les subventions de la National Science Foundation n° ECS-0325383, IIS-0312802, IIS 0082995, ECS-0326095, ANI-0224419, NASA Grant No. AC#98-516, une subvention AFOSR sur le contrôle intelligent, le projet ERATO Kawato Dynamic Brain financé par l'Agence japonaise pour la science et la technologie et les laboratoires de neurosciences informatiques ATR.

RÉFÉRENCES

Aggarwal, JK et Cai, Q (1999). « Analyse du mouvement humain : une revue. » Calculer. Vis. Image comprise. 73, 428-440.

Albu-Schäffer, A, Ott, C et Hirzinger, G (2007). "Un cadre de contrôle unifié basé sur la passivité pour le contrôle de la position, du couple et de l'impédance des robots à articulations flexibles." Int. J.Robot. Rés. 26, 23-39.

An, CH, Atkeson, CG et Hollerbach, JM (1988). Contrôle basé sur un modèle d'un robot manipulateur, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, M (1995a). Le manuel de théorie du cerveau et des réseaux de neurones, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, MA (1995b). «Théorie des schémas». Dans The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Arbib, MA (éd.), pp. 830-834, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, MA (2006). Action sur le langage via le système de neurones miroirs, Cambridge University Press, Cambridge, MA.

Arimoto, S, Sekimoto, M, Hashiguchi, H et Ozawa, R (2005). « Résolution naturelle du mauvais positionnement de la cinématique inverse pour les robots redondants : un défi pour le problème des degrés de liberté de Bernstein. » Av. Rob. 19, 401-434.

Aryananda, L et Weber, J (2004). « MERTZ : à la recherche d'un robot à tête humanoïde à vision active robuste et évolutif. » Dans, Vol 2, pp. 513-532.

Atkeson, CA, Aboaf, EW, McIntyre, J et Reinkensmeyer, DJ (1986). "Apprentissage robot basé sur un modèle." Quatrième Symposium international sur la recherche en robotique, 2318-2330.

Atkeson, CG, Hale, J, Kawato, M, Kotosaka, S, Pollick, F, Riley, M, Schaal, S, Shibata, S, Tevatia, G et Ude, A (2000). "Utiliser des robots humanoïdes pour étudier le comportement humain." Informations IEEE. Système. 15, 46-56.

Atkeson, CG, Moore, AW et Schaal, S (1997a). « Pondéré localement apprentissage." Artif. Intell. Rév. 11, 11-73.

Atkeson, CG, Moore, AW et Schaal, S (1997b). « Apprentissage pondéré localement pour le contrôle.» Artif. Intell. Rév. 11, 75-113.

Barto, AG et Mahadevan, S (2003). « Progrès récents dans l'apprentissage par renforcement hiérarchique. » Dynamique des événements discrets. Système. 13, 341-379.

Beek, PJ (1989). Jongler avec la dynamique, Free University Press, Amsterdam.

Bellman, R (1957). Programmation dynamique, Université de Princeton Presse, Princeton, New Jersey.

Bentivegna, DC, Atkeson, CA et Cheng, G (2004a). « Tâches d'apprentissage à partir de l'observation et de la pratique. » Rob. Auton. Système. 47, 163-169.

Bentivegna, DC, Cheng, G et Atkeson, CG (2004b). "Apprendre par l'observation et par la pratique en utilisant des primitives comportementales." 11e Symposium international sur la recherche en robotique (ISRR2003), Springer, Ciena, Italie.

Billard, A, Epars, Y, Calinon, S, Cheng, G et Schaal, S (2004). "Découvrir les stratégies d'imitation optimales." Rob. Auton. Système. 47, 68-77.

Braun, J (1994). « Recherche visuelle parmi des éléments d'importance différente : La suppression de l'attention visuelle imite une lésion dans la zone extrastriée V4. J. Neurosci. 14, 554-567.

Breazeal, C, Edsinger, A, Fitzpatrick, P et Scassellati, B (2001). « Vision active pour des robots sociables. » IEEETrans. Système. Homme Cybern. 31, 443-453.

Breazeal, C, et Scassellati, B (2002). "Des robots qui imitent les humains." Tendances Cogn. Sci. 6, 481-487.

Bredendfeld, A, Jacoff, A, Noda, I et Takahashi, Y (2006). Robocup 2005 : IXe Coupe du monde de robot soccer, Springer, New York.

Brock, O, Fagg, AH, Grupen, R, Platt, R, Rosenstein, M et Sweeney, J (2005). "Un cadre pour l'apprentissage et le contrôle des robots humanoïdes intelligents." Int. J. Robotique humanoïde 2, 301-336.

Brown, IE, Cheng, EJ et Loeb, GE (1999). « Propriétés mesurées et modélisées du muscle squelettique des mammifères. II. Les effets de la fréquence des stimulus sur les relations force-longueur et force-vitesse. J. Rés.musculaire. Cellule Motil. 20, 627-643.

Brown, IE et Loeb, GE (1999). « Propriétés mesurées et modélisées du muscle squelettique des mammifères. I. Les effets de la potentialisation post-activation sur l'évolution temporelle et les dépendances à la vitesse de la production de force. J.Muscle Res. Cellule Motil. 20, 443-456.

Bullock, D et Grossberg, S (1988). "Dynamique neuronale des mouvements planifiés des bras : invariants émergents et propriétés vitesse-précision lors de la formation de la trajectoire." Psychologie. 95, 49-90.

Burridge, RR, Rizzi, AA et Koditschek, DE (1999). "Composition séquentielle de comportements de robots dynamiquement adroits." Int. J.Robot. Rés. 18, 534-555.

Byrne, RW et Russon, AE (1998). « Apprendre par imitation : un approche hiérarchique. » Comportement. Science du cerveau. 21, 667-684 ; discussion 684-721.

Carmi, R et Itti, L (2006). "Causes visuelles versus corrélats de la sélection attentionnelle dans les scènes dynamiques." Vision Rés. 46, 4333-4345.

Collins, S, A. Ruina, R. Tedrake et M. Wisse (2005). "Des robots bipèdes efficaces basés sur des marcheurs passifs-dynamiques." Sciences 307, 1082-1085.

Coradeschi, S, Ishiguro, H, Asada, M, Shapiro, SC, Thielscher, M, Breazeal, C, Mataric, MJ et Ishida, H (2006). "Des robots inspirés par l'homme." Informations IEEE. Système. 21, 74-85.

Dautenhahn, K et Nehaniv, CL, (éd.) (2002). L'imitation chez les animaux et Artefacts, MIT Press, Cambridge, MA.

Daw, ND, et Touretzky, DS (2002). « Prédiction des récompenses à long terme chez T. D. modèles du système dopaminergique. Calcul neuronal. 14, 2567-2583.

Demiris, J et Hayes, G (2002). "L'imitation en tant que processus à double voie comportant des composants prédictifs et d'apprentissage, un modèle informatique biologiquement plausible." Dans Imitation in Animals and Artificats, Dautenhahn, K et Nehaniv, CL, (éd.), pp. 327-361, MIT Press, Cambridge, MA.

Demiris, J, Rougeaux, S, Hayes, GM, Berthouze, L et Kuniyoshi, Y (1997). « Imitation différée des mouvements de la tête humaine par une tête à vision stéréo active. » Atelier international IEEE sur la communication humaine entre robots, Sendai, Japon.

Doya, K, Samejima, K, Katagiri, K et Kawato, M (2002). « Apprentissage par renforcement basé sur plusieurs modèles. » Calcul neuronal. 14, 1347-1369.

Driscoll, J, Peters, R et Cave, K (1998). "Un réseau d'attention visuelle pour un robot humanoïde." Proc. Conférence internationale IEEE/RSJ sur les robots et systèmes intelligents (IROS-98).

Dyer, P et McReynolds, SR (1970). Le calcul et la théorie du contrôle optimal, académique.

Featherstone, R et Khatib, O (1997). "Indépendance de la charge de l'inverse dynamiquement cohérent de la matrice jacobienne." Int. J. Robot. Rés. 16, 168-170.

Flanagan, JR, Bowman, MC et Johansson, RS (2006). "Contrôle stratégies dans les tâches de manipulation d'objets. Curr. Avis. Neurobiol. 16, 650-659.

Flanagan, JR et Johansson, RS (2003). « Les plans d'action utilisés en action observation." Nature (Londres) 424, 769-771.

Franklin, DW, R. Osu, E. Burdet, M. Kawato et TE Milner (2003). "Adaptation aux dynamiques stables et instables obtenue par un contrôle d'impédance combiné et un modèle de dynamique inverse." J. Neurophysiol. 90, 3270-3282.

Frith, CD et Wolpert, DM (2004). Les neurosciences du social Interaction : décoder, imiter et influencer les actions des autres, The Royal Society, Oxford University Press, Oxford.

Fujiwara, K, Kanehiro, F, Kajita, S, Kaneko, K, Yokoi, K et Hirukawa, H (2002). UKEMI : contrôle des mouvements de chute pour minimiser les dommages au robot humanoïde bipède. Dans, vol 3, pp. 2521-2526.

Gallese, V et Goldman, A (1998). "Les neurones miroirs et la théorie de la simulation de la lecture des pensées." Tendances Cogn. Sci. 2, 493-501.

Gavrila, DM (1997). «L'analyse visuelle des mouvements humains: une enquête.» Calculer. Vis. Image comprise. 73, 82-98.

Gomi, H et Kawato, M (1996). "Hypothèse de contrôle du point d'équilibre

- examiné par la rigidité mesurée du bras lors d'un mouvement multiarticulaire. *Sciences* 272, 117-220.
- Haruno, M, Wolpert, DM et Kawato, M (2001). "Modèle en mosaïque pour l'apprentissage et le contrôle sensorimoteurs." *Calcul neuronal*. 13, 2201-2220.
- Ijspeert, A, Nakanishi, J et Schaal, S (2003). "Apprendre des paysages attracteurs pour apprendre les primitives motrices." Dans *Advances in Neural Information Processing Systems* 15, Becker, S, Thrun, S et Obermayer, K, (éd.), pp. 1547-1554, MIT Press, Cambridge MA.
- Inamura, T, Iwaki, T, Tanie, H et Nakamura, Y (2004). «Émergence de symboles incarnés basée sur la théorie de la mimesis.» *Int. J.Robot. Rés.* 23, 363-377.
- Itti, L, Dhavale, N et Pighin, F (2003). "Animation réaliste des yeux et de la tête d'un avatar utilisant un modèle neurobiologique d'attention visuelle." *Actes du 48e Symposium international annuel SPIE sur la science et la technologie optiques*, 64-78.
- Itti, L et Koch, C (2000a). "Une comparaison des stratégies de combinaison de fonctionnalités pour les systèmes d'attention visuelle basés sur la saillance." *Actes du SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV (HVEI99)*, 3644, 473-482.
- Itti, L et Koch, C (2000b). "Un mécanisme de recherche basé sur la saillance pour les changements d'attention visuelle manifestes et cachés." *Vision Rés.* 40, 1489-1506.
- Itti, L et Koch, C (2001). "Modélisation informatique de l'attention visuelle." *Nat. Révérend Neurosci.* 2, 194-203.
- Jenkins, OC (2003). « Dérivation de compétences basée sur les données pour les agents humanoïdes autonomes. » Département d'informatique, Université de Californie du Sud, Los Angeles.
- Johansson, G (1973). "Perception visuelle du mouvement biologique et modèle pour son analyse." *Percevoir. Psychophyse.* 14, 201-211.
- Kajita, S et Tani, K (1996). «Étude expérimentale de la marche dynamique des bipèdes.» *Système de contrôle IEEE. Mag.* 16, 13-19.
- Kanda, T, Ishiguro, H, Imai, M et Ono, T (2004). « Développement et évaluation de robots humanoïdes interactifs. » *Proc. IEEE* 92, 1839-1850.
- Kawato, M (1999). «Modèles internes pour le contrôle moteur et la planification de trajectoire.» *Curr. Avis. Neurobiol.* 9, 718-727.
- Khatib, O (1987). "Une approche unie du contrôle du mouvement et de la force des robots manipulateurs : la formulation de l'espace opérationnel." *Int. J.Robot. Rés.* 31, 43-53.
- Khatib, O, Brock, O, Chang, K, Conti, F, Ruspini, D et Sentis, L (2002). «Robotique et simulation interactive». *Commun. ACM* X, 46-51.
- Khatib, O, Sentis, L, Park, J et Warrent, J (2004). "Comportement dynamique du corps entier et contrôle de robots ressemblant à des humains." *Int. J. Robot humanoïde.* 1, 1-15.
- Koch, C et Ullman, S (1985). « Changements dans l'attention visuelle sélective : vers les circuits neuronaux sous-jacents. » *Hum. Neurobiol.* 4, 219-227.
- Kozima, H et Ito, A (1998). Une approche basée sur l'attention pour l'acquisition de symboles. Dans, pp. 852-856.
- Loeb, GE (2001). "Apprendre à partir de la moelle épinière." *J. Physiol.* 533, 111-117.
- Mataric, M (1998). «La robotique basée sur le comportement comme outil de synthèse du comportement artificiel et d'analyse du comportement naturel.» *Tendances Cogn. Sci.* 2, 82-86.
- Mataric, M (2000). "Faire bouger et imiter les humanoïdes." *Informations IEEE. Système.* 15, 18-24.
- McGeer, T (1990). «Marche dynamique passive.» *Int. J.Robot. Rés.* 9, 633-643.
- Meltzoff, AN et Moore, MK (1994). «Imitation, mémoire et représentation des personnes.» *Comportement du nourrisson. Dév.* 17, 83-99.
- Menzel, P et D'Alusio, F (2000). *Robosapiens : évolution d'un nouveau* Espèces, MIT Press, Cambridge, MA.
- Miall, RC et Wolpert, DM (1996). «Modèles avancés pour la physiologie contrôle moteur." *Réseaux de neurones* 9, 1265-1285.
- Miyamoto, H et Kawato, M (1998). "Un robot d'apprentissage du service et de la montée en puissance du tennis basé sur la théorie bidirectionnelle." *Réseaux de neurones* 11, 1331-1344.
- Miyamoto, H, Schaal, S, Gandolfo, F, Koike, Y, Osu, R, Nakano, E, Wada, Y et Kawato, M (1996). "Un robot d'apprentissage Kendama basé sur la théorie bidirectionnelle." *Réseaux de neurones* 9, 1281-1302.
- Nakamura, Y (1991). *Robotique avancée : redondance et optimisation*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Nakanishi, J, Mistry, M et Schaal, S (soumis). "Contrôle dynamique inverse avec base flottante et contraintes." *Conférence internationale sur la robotique et l'automatisation (ICRA2007)*.
- Narendra, KS et Annaswamy, AM (2005). *Systèmes adaptatifs stables*, Douvres, Mineola, New York.
- Navalpakkam, V et Itti, L (2005). « Modéliser l'influence de la tâche sur l'attention. » *Vision Rés.* 45, 205-231.
- Ng, AY et Russell, S (2000). "Algorithmes pour l'apprentissage par renforcement inverse." *Actes de la dix-septième conférence internationale sur l'apprentissage automatique (ICML 2000)*, Stanford, Californie.
- Osu, R, Kamimura, N, Iwasaki, H, Nakano, E, Harris, CM, Wada, Y et Kawato, M (2004). "Contrôle optimal de l'impédance pour l'accomplissement des tâches en présence de bruit dépendant du signal." *J. Neurophysiol.* 92, 1199.
- Paneral, F, Metta, G et Sandini, G (2003). "Apprendre les réflexes de stabilisation visuelle chez les robots aux yeux mobiles." *Neuroinformatique* 48, 16.
- Parker, LE, Schneider, FE et Schultz, AC (2005). « Systèmes multi-robots : des essais aux automates intelligents. » Vol. III, *Actes de l'atelier international 2005 sur les systèmes multi-robots*, Springer, Dordrecht.
- Peters, J, Mistry, M, Udawadia, FE, Cory, R, Nakanishi, J et Schaal, S (2005a). «Un cadre unificateur pour le contrôle des systèmes robotiques.» *Conférence internationale de l'IEEE sur les robots et systèmes intelligents (IROS 2005)*, Edmonton, Alberta, Canada, du 2 au 6 août, 1824-1831.
- Peters, J, Mistry, M, Udawadia, FE et Schaal, S (2005b). «Une nouvelle méthodologie pour la conception de commandes de robots.» *Cinquième conférence internationale de l'ASME sur les systèmes multicorps, la dynamique non linéaire et le contrôle (MSNDC 2005)*, Long Beach, Californie, du 24 au 28 septembre.
- Peters, J et Schaal, S (2006). "Apprendre le contrôle opérationnel de l'espace." Dans *Robotics: Science and Systems (RSS 2006)*, Burgard, W, Sukhatme, GS et Schaal, S, (éd.), MIT Press, Cambridge, MA.
- Peters, J, Vijayakumar, S et Schaal, S (2003a). "Apprentissage par renforcement pour la robotique humanoïde." *Humanoids 2003, troisième conférence internationale IEEE-RAS sur les robots humanoïdes*, Karlsruhe, Allemagne, 29 et 30 septembre.
- Peters, J, Vijayakumar, S et Schaal, S (2003b). « Mise à l'échelle des paradigmes d'apprentissage par renforcement pour l'apprentissage moteur. » *Actes du 10e Symposium conjoint sur le calcul neuronal (JSNC 2003)*, Irvine, Californie, mai.
- Peters, J, Vijayakumar, S et Schaal, S (2005c). « Acteur-critique naturel ». Gama, J, R. Camacho, P, Brazdil, A, Jorge et L. Torgo (éd.), *Actes de la 16e Conférence européenne sur l'apprentissage automatique (ECML 2005)*, vol 3720, Springer, Porto, Portugal, 3 octobre. –7, p. 280-291.
- Piaget, J. (1951). *Jeu, rêves et imitation dans l'enfance*, Norton, Nouveau York.
- Righetti, L et Ijspeert, A (2006). "Méthodologies de conception pour les générateurs de modèles centraux : une application aux humanoïdes rampants." *Actes de robotique : science et systèmes*, MIT Press, Philadelphie.
- Rizzolatti, G et Arbib, MA (1998). «La langue à notre portée». *Tendances Neurosci.* 21, 188-194.
- Robins, B, Dautenhahn, K, Boekhorst, R et Billard, A (2005). « Assistants robotiques dans la thérapie et l'éducation des enfants autistes : un petit robot humanoïde peut-il contribuer à encourager les compétences d'interaction sociale ? L'accès universel dans la société de l'information 4.
- Russell, SJ et Norvig, P (1995). *Intelligence artificielle : une approche moderne*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Sabes, PN (2000). «La planification et le contrôle des mouvements d'atteinte.» *Curr. Avis. Neurobiol.* 10, 740-746.
- Saltzman, EL (1979). « Niveaux de représentation sensorimotrice. » *J. Math. Psychologie.* 20, 91-163.
- En ligne Scassellati, B (1998). "Imitation et mécanismes d'attention conjointe : A. structure de développement pour développer les compétences sociales dans un robot humanoïde." Dans *Calcul pour les métaphores, l'analogie et les agents*, Nehaniv, C. L, pp. 176-195, Springer, New York.
- En ligne Scassellati, B (2002). "Théorie de l'esprit pour un robot humanoïde." *Auton. Rob.* 12.
- Schaal, S (1999). « L'imitation est-elle l'apprentissage de la voie vers les robots humanoïdes ? *Tendances Cogn. Sci.* 3, 233-242.

Revue HFSP

Schaal, S (2002) « Apprentissage du contrôle des robots ». Dans The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, 2e éd., Arbib, M. A, MIT Press, Cambridge, MA, pp.

Schaal, S, Systèmes dynamiques : cerveau, corps et imitation. En action sur le langage via le système Mirror Neuron (sous presse).

Schaal, S et Atkeson, CG (1994). "Apprentissage robot par régression non paramétrique." Actes de la Conférence internationale sur les robots et systèmes intelligents (IROS'94). Munich, Allemagne, pp. 478-485.

Schaal, S, Atkeson, CG et Botros, S (1992). « Que faut-il apprendre ? Actes du septième atelier de Yale sur les systèmes adaptatifs et d'apprentissage, New Haven, CT, 20-22 mai, pp.

Schaal, S, Atkeson, CG et Vijayakumar, S (2002). "Techniques évolutives à partir de statistiques non paramétriques pour l'apprentissage des robots en temps réel." Appl. Intell. 17, 49-60.

Schaal, S, Ijspeert, A et Billard, A (2003). "Approches informatiques de l'apprentissage moteur par imitation." Philos. Trans. R. Soc. Londres, Ser. B 358, 537-547.

Schaal, S, J. Peters, J. Nakanishi et A. Ijspeert. (2004). « Apprentissage des primitives du mouvement. » Symposium international sur la recherche en robotique (ISRR2003), Springer, Cien, Italie.

Schaal, S et Schweighofer, N (2005). « Contrôle moteur informatique chez les humains et les robots. » Curr. Avis. Neurobiol. 15, 675-682.

Schmidt, RA (1988). « Contrôle moteur et apprentissage. » Cinétique humaine, Champaign, IL.

Scholz, JP et Schoner, G (1999). "Le concept de collecteur non contrôlé : identifier les variables de contrôle pour une tâche fonctionnelle." Exp. Cerveau Res. 126, 289-306.

Schweighofer, N, et Doya, K (2003). « Le méta-apprentissage en renforcement apprentissage." Réseaux de neurones 16, 5-9.

Schweighofer, N, Doya, K et Kuroda, S (2004). « Neuromodulation aminergique cérébelleuse : vers une compréhension fonctionnelle. » Cerveau Res. Rév. (sous presse).

Sciavicco, L et Siciliano, B (1996). Modélisation et contrôle de robots manipulateurs, MacGraw-Hill, New York.

Sciavicco, L et Siciliano, B (2000). Modélisation et contrôle de robots manipulateurs, Springer, Londres.

Sentis, L et Khatib, O (2004). « Contrôle orienté tâches des robots humanoïdes grâce à la priorisation. » Conférence internationale IEEE-RAS/RSJ sur les robots humanoïdes, Santa Monica, Californie, du 10 au 12 novembre.

Shadmehr, R et Wise, SP (2005). "La neurobiologie informatique de l'atteinte et du pointage : une base pour l'apprentissage moteur." MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Shibata, T, Vijayakumar, S, Conradt, J et Schaal, S (2001). « Contrôle oculomoteur biomimétique. » Comportement adaptatif 9, 189-207.

Slotine, JJ. E et Li, W (1991). Contrôle non linéaire appliqué, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Strogatz, SH (1994). "Dynamique non linéaire et chaos : avec applications à la physique, à la biologie, à la chimie et à l'ingénierie." Addison-Wesley, Reading, MA.

Sutton, RS et Barto, AG (1998). Apprentissage par renforcement. Une introduction. MIT Press, Cambridge.

Taub, E et Wolf, SL (1997). "Techniques induites par la contrainte pour faciliter l'utilisation des membres supérieurs chez les patients victimes d'un AVC." Sujets de réadaptation après un AVC 3, 38-61.

Todorov, E. (2005). « Méthodes de contrôle et d'estimation optimales stochastiques adaptées aux caractéristiques sonores du système sensorimoteur. » Calcul neuronal. 17, 1084-1108.

Todorov, E et Jordan, MI (2002). « Le contrôle par rétroaction optimal en tant que théorie de la coordination motrice. » Nat. Neurosci. 5, 1226-1235.

Tomasello, M, Savage-Rumbaugh, S et Kruger, AC (1993). "Apprentissage imitatif des actions sur les objets par les enfants, les chimpanzés et les chimpanzés en culture." Chim. Oggi 64, 1688-1705. van der Lee, JH, Wagenaar, RC, Lankhorst,

GJ, Vogelaar, TW, Deville, WL et Bouter, LM (1999). « Utilisation forcée du membre supérieur chez les patients souffrant d'accidents vasculaires cérébraux chroniques : résultats d'un essai clinique randomisé en simple aveugle. » Coup 30, 2369-2375.

van Essen, DC, et Maunsell, JM. R (1983). "Organisation hiérarchique et flux fonctionnels dans le cortex visuel." Tendances Neurosci. 6, 370-375.

Vijayakumar, S, Conradt, J, Shibata, T et Schaal, S (2001). "Attention visuelle manifeste pour un robot humanoïde." Conférence internationale de l'IEEE sur les robots et systèmes intelligents (IROS 2001).

Vijayakumar, S, D'Souza, A et Schaal, S (2005). « Apprentissage en ligne incrémental en hautes dimensions. » Calcul neuronal. 17, 1-33.

Vijayakumar, S et Schaal, S (2000). "Apprentissage en temps réel chez les humanoïdes : un défi pour l'évolutivité des algorithmes en ligne." Humanoïdes 2000, première conférence internationale IEEE-RAS sur les robots humanoïdes. Actes du CD, Cambridge, MA.

Viviani, P, Baud-Bovy, G et Redolfi, M (1997). "Percevoir et suivre les stimuli kinesthésiques : preuves supplémentaires d'interactions motrices et perceptuelles." J. Exp. Psychologique. Hum. Percevoir. Effectuer. 23, 1232-1252.

Viviani, P et Schneider, R (1991). « Une étude développementale de la relation entre la géométrie et la cinématique dans les mouvements de dessin. » J. Exp. Psychologique. Hum. Percevoir. Effectuer. 17, 198-218.

Wada, Y et Kawato, M (1995). "Une théorie de l'écriture cursive basée sur le principe de minimisation." Biol. Cybern. 73, 3-13.

Wiener, N. (1948). Cybernétique, Wiley, New York.

Wolf, SL et Blanton, S (1999). « Une application de la thérapie par le mouvement induit par la contrainte des membres supérieurs chez un patient ayant subi un AVC subaigu. » Phys. Là. 79, 847-953.

Wolpert, DM, Doya, K et Kawato, M (2003). « Un cadre informatique unificateur pour le contrôle moteur et l'interaction sociale. » Philos. Trans. R. Soc. Londres, Ser. B 358, 593-602.

Wolpert, DM, Doya, K et Kawato, M (soumis) « Une approche unificatrice cadre informatique pour le contrôle moteur et l'interaction sociale. Philos. Trans. R. Soc. Londres, Ser. B.

Wolpert, DM et Kawato, M (1998). « Plusieurs modèles couplés avant et arrière pour le contrôle du moteur. » Réseaux de neurones 11, 1317-1329.

Zinn, M, Khatib, O, Roth, B et Salisbury, JK (2004). "Jouer en toute sécurité [robots respectueux des humains]." Robot. Automatique. Mag. 11, 12-21.