Robotique et santé

Robot médical présenté à Automatica.

Discrète, la robotique pour les applications médicales n'en demeure pas moins un espace de recherche qui tente de résoudre une équation associant concepteurs, fabricants, distributeurs, prescripteurs et financiers.

Riche idée de la part du Sup'Biotech d'avoir organisé ses « Transversales Santé », sur le thème de la robotique médicale. Ce fut l'occasion pour quelques illustres personnes de faire l'état des lieux en la matière, mais également de se poser quelques questions technico-économiques.

LES ROBOTS CHIRURGIENS

Pour Philippe Bidaud, directeur de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR), Université Pierre et Marie Curie, CNRS, *« les technologies de la robotique offrent un potentiel considérable de développement de systèmes pour des interventions chirurgicales non invasives, la suppléance fonctionnelle, la rééducation ou les aides pour diverses formes de handicap moteur et cognitif, ou plus simplement pour les personnes âgées. Ces technologies reposent sur des architectures souvent complexes réunissant des systèmes mécaniques, électroniques, et les logiciels associés, mais aussi des « contenus » adaptés à la réalisation de fonctions thérapeutiques, de diagnostics comme la rééducation. »*

L'ISIR a été créé le 1er janvier 2007 par le regroupement de plusieurs équipes de recherche en sciences de l'ingénieur et en neurosciences de l'Université Pierre et Marie Curie dans l'objectif de former des équipes de recherche pluridisciplinaires, allant de la mécanique à l'automatique en passant par le traitement du signal ou la biologie, et dont les travaux sont centrés sur les grandes problématiques de la robotique et du vivant.

Ces travaux touchent également aux fonctions complexes du cerveau avec l'émergence des « interfaces cerveau-ordinateur » qui pourraient permettre à terme de commander des organes artificiels robotisés « par la pensée ».

A l'ISIR, un groupe de recherche, dirigé par Guillaume Morel, a en charge le développement de systèmes d'assistance à la chirurgie. Il existe déjà sur le marché plusieurs « robots chirurgiens » auxquels on reconnaît des qualités : notamment la précision des gestes, l'accessibilité à des zones où la main ne peut aller… Mais leur coût d'utilisation et de maintenance, leur complexité, leur encombrement, à l'image du robot Da Vinci, expliquent que, dans leurs formes actuelles, ils ne soient pas adaptés à des fonctions d'usage quotidien dans des blocs opératoires et qu'ils restent sous-exploités dans les hôpitaux.

Aussi, il est nécessaire de réaliser des recherches visant à mettre en œuvre des systèmes d'assistance chirurgicaux véritablement opérationnels. L'un des problèmes à résoudre est l'absence de retour tactile (haptique) des interactions entre les tissus et les instruments. L'ISIR développe des instruments qui restituent cette information tactile, permettant de maîtriser les interactions des instruments insérés par un trocart. Une autre problématique faisant l'objet de recherches est la coordination entre la main et l'oeil, et le guidage par l'image avec des outils 2D et 3D qui permettraient, par exemple, de localiser très précisément la pointe d'un instrument manipulé par un robot.

ASSISTER LES PERSONNES

Cette problématique comprend des recherches visant à créer des interfaces homme-systèmes permettant d'interagir et de commander des systèmes robotiques, des méthodes de traitement du signal qui rendent un robot capable d'interpréter un geste, des techniques de reconnaissance des visages et des expressions faciales, des systèmes d'analyse des activités posturales, et diverses interfaces visant à suppléer et assister les fonctions motrices et cognitives ou à restituer la mobilité et l'autonomie des personnes handicapées ou âgées.

Ces recherches font largement appel à la modélisation. Par exemple, un robot ne pourra quantifier un comportement moteur à des fins diagnostiques ou de rééducation que s'il peut rapporter les données observées à une base de modèles. Celle-ci devra intégrer des données relatives aux structures neuronales et aux apprentissages nécessaires à la réalisation des mouvements, mais aussi des données relatives à ce qui se passe dans les muscles et les articulations lors des différents mouvements, ainsi que des données de perception de l'environnement.

CONTRÔLE MOTEUR HUMAIN NORMAL OU PATHOLOGIQUE

De son côté, Agnès Roby-Brami, du laboratoire « Neurophysique et physiologie », Université Paris Descartes, s'est concentrée sur l'étude du contrôle moteur humain par le système nerveux central, dont l'un des objectifs est de mieux comprendre les interactions homme-machine. Les robots peuvent soit intervenir pour

L'EXOSQUELETTE DU CEA-LIST

C'est dans le cadre du salon Automatica à Munich, plutôt spécialisé dans la robotique industrielle, que le CEA-List a présenté son nouveau exosquelette épousant la morphologie du bras humain. Ce prototype pourrait, à terme, évoluer vers une orthèse complète à sept degrés de liberté motorisés. Sa chaîne d'actionnement, issue de brevets exclusifs, est faite de câbles aéronautiques et de vis-écrous réversibles.

	Muscle (biceps)	CEA actuator
Maximum angle motion	150 °	130 °
Maximum torque	35 N.m	30 N.m
Maximum speed	30 rad/s	19 rad/s
Energetic efficiency	25 %	93 %
Volume/power ratio	0.0012 m^3 / 1050 W	0.001 m^3 / 570 W
Weight/power ratio0	1.25 kg / 1050 W	1.9 kg / 570 W

Caractéristiques d'un exosquelette 4 axes.

Par ailleurs, des modélisations ont permis de reproduire les frottements des articulations en vue de leur compensation. Cette orthèse est au centre de deux projets : l'un avec l'Association Française contre les Myopathies et l'Hôpital de Garches, pour l'assistance des personnes handicapées, l'autre avec le Laboratoire de robotique de Paris pour la rééducation par kinésithérapie. Elle constitue également une plate-forme de développement de la cobotique – la robotique au plus près du corps humain – notamment pour le projet de robot chirurgien Surgicobot, financé par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du réseau TecSan (Technologies pour la Santé).

L'exosquelette est basé sur une technologie brevetée appelée « cable jack actuator » déjà appliqué précédemment sur le retour de force du bras maître Virtuose 6D4040 d'Haption. L'actionneur est composé d'un système de « balle-vis » tirant sur un circuit de transmission par câble. Ce système présente une forte capacité de force combinée à une faible friction hystérésis (moins de 0,5 ‰ de la capacité statique), mais aussi à un rendement atteignant jusqu'à 95 %. L'exosquelette a été découpé en deux bras, afin de réduire la longueur du câble. En même temps il a été décidé de réduire la masse en mouvement en supprimant les moteurs à proximité de l'articulation et en utilisant des matériaux légers comme le carbone.

rééduquer un membre paralysé en le forçant à travailler de manière répétitive, soit évaluer les performances du mouvement à des fins de diagnostics et de suivi.

Les mouvements du corps humain reposent sur une mécanique complexe, des systèmes multiarticulés, redondants (pour chaque position de la main, par exemple, existent une infinité de configurations possibles du bras), et qui font intervenir un très grand nombre de muscles concourant à la même fonction, sous le contrôle permanent des organes des sens et du cerveau. Ce sont les chercheurs en robotique qui ont fait comprendre aux physiologistes la complexité des calculs que le cerveau doit résoudre pour commander les mouvements. A l'évidence, l'étude du mouvement ne peut être que multidisciplinaire, associant l'analyse du système nerveux central par des techniques d'électrophysiologie et d'imagerie à la modélisation mathématique et à la simulation sur ordinateurs. Les mécanismes du contrôle moteur par le cerveau sont encore controversés.

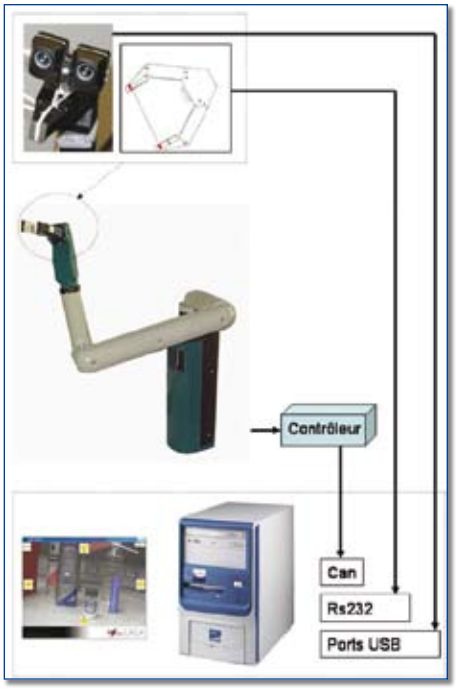
Deux théories, issues de la robotique, tentent d'en rendre compte. Selon la première, la théorie des « modèles internes », proposée par le roboticien et physiologiste japonais Mitsuo Kawato en 1998, le système nerveux central (SNC) est un contrôleur adaptatif et l'apprentissage du mouvement se réalise par la construction de modèles internes de programmes moteurs au niveau du cervelet. Pour la deuxième, la théorie des systèmes dynamiques, il n'y a pas stockage de modèles mais émergence des caractéristiques du mouvement « en ligne », à partir des contraintes mécaniques du corps et de l'environnement. Cette théorie fait appel à une modélisation non linéaire du mouvement.

Les travaux expérimentaux de Marc Jeannerod dans les années 1980 ont été pionniers dans l'approche scientifique du mouvement. Par exemple, une expérience consiste à installer des capteurs sur le poignet et au bout des doigts, puis à demander au sujet de saisir des objets à trois distances différentes. La vitesse du capteur fixé sur le poignet décrit alors une courbe très fluide, et non pas saccadée, ce qui montre que le mouvement est anticipé. Il n'y pas de rétrocontrôle permanent du mouvement par les yeux : en même temps que le poignet se déplace vers la cible, le mouvement d'ouverture de la main est préparé. Si l'on compare des sujets valides et des patients, la courbe du mouvement est beaucoup moins fluide chez ces derniers.

Des techniques optiques associées à des enregistrements électromyographiques peuvent mesurer la réaction au sol lors d'une marche. On peut reconstituer grâce à la modélisation biomécanique les variables de rotation angulaire des articulations, les couples, l'activation des muscles, etc. Ces analyses, utilisées aux Etats-Unis, commencent à l'être en Europe par les chirurgiens pour décider des interventions orthopédiques et organiser le suivi des patients.

Dans le laboratoire d'Agnès Roby-Brami, les techniques associant capteurs électromagnétiques et modélisation biomécanique sont développées pour analyser le mouvement et établir des comparaisons entre

sujets valides et handicapés, dans une perspective de rééducation et en collaboration avec l'hôpital de Garches. Ces techniques sont d'abord testées sur la plate-forme sensorimotricité Paris Descartes. Par exemple, chez un patient hémiparésique (paralysie incomplète d'une



Architecture du système Manus d'ExactDynamics.

moitié du corps) par suite d'un accident vasculaire cérébral, l'atteinte de la partie controlatérale peut régresser spontanément et les patients récupèrent progressivement. L'analyse du mouvement par ces techniques permet alors d'apprécier les progrès de la rééducation et d'améliorer la prise en charge des déficiences.

A terme, ces méthodes pourront être utilisées dans des conditions « nomades », hors laboratoires, grâce à des techniques incluant des capteurs inertiels portés par les personnes à la maison ou sur leur lieu de travail et le couplage avec des capteurs environnementaux.

L'AIDE AUX PERSONNES HANDICAPÉES

Autre domaine de recherche, utilisant les expériences industrielles, c'est la robotique d'aide aux personnes handicapées. Pour Rodolphe Gelin, responsable des programmes « Systèmes interactifs » au Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies (LIST), CEA, le début des travaux remontent aux années 70. *« Depuis les années 1970, le CEA a transféré son expertise issue de la robotique en milieu hostile, qui avait mené à la création de plusieurs systèmes à retour d'effort, à la recherche de systèmes robotiques d'aide aux personnes handicapées. »*

Initialement le projet Spartacus a été mené avec l'Inria et l'Inserm en vue de mettre au point un robot permettant aux tétraplégiques de recouvrer une certaine autonomie. Le projet n'avait pas vocation à déboucher sur un produit industriel, compte tenu de son coût et de son encombrement. Le premier vrai robot commercialisable d'assistance aux handicapés, MASTER (Manipulateur autonome au service des tétraplégiques pour l'environnement et la réadaptation), est né à la fin des années 1980. Il possédait six degrés de liberté. Fixe, installé dans une station de travail, il manipulait des objets à la place de la personne grâce à un bras articulé.

Ce robot a connu plusieurs générations mais l'entreprise qui avait pris le risque de l'industrialiser, Afma Robots, n'en a pas commercialisé un seul. A cette époque, le rapprochement avec l'Hôpital universitaire Raymond Poincaré de Garches et d'autres centres de rééducation a permis de mieux appréhender les besoins des handicapés et de mettre en place une évaluation des systèmes robotiques. Cette collaboration se poursuit aujourd'hui.

Dans ce cadre collaboratif, le LIST a mis au point le système Aviso, un dispositif capable d'aller chercher les objets environnants une fois que la personne les a sélectionnés sur un écran d'ordinateur. Il repose sur un bras articulé Manus de la société néerlandaise Exact Dynamics, fixé sur le fauteuil roulant, et sur un système de visualisation de l'environnement : des caméras installées sur la pince du robot présentent les images des objets à la personne handicapée. Celle-ci, à l'aide d'un joystick, peut désigner l'objet qu'elle souhaite faire saisir.

L'étape suivante a consisté à créer un robot capable de se mouvoir tout seul en intégrant le système AVISO sur une base mobile qui peut aller chercher un objet à distance. Ce robot, nommé SAM, a été développé dans le cadre du projet européen ANSO (*Autonomic networks for SOHO users*), lancé en 2005. Les recherches actuelles portent sur la simplification de l'interface homme-machine afin de pouvoir installer ce type de robot dans un vrai appartement thérapeutique de centres de rééducation. Cette phase permettra aux personnes handicapées de s'approprier le système, de l'évaluer et d'exprimer de nouveaux besoins.

LA RÉÉDUCATION DES MEMBRES

Le deuxième grand thème de la robotique d'assistance aux handicapés est la rééducation : comment les aider à recouvrer de la motricité ? A cette fin, le LIST a lancé le projet Kinéhaptique à partir de robots à retour d'effort développés pour le nucléaire. L'objectif est de définir un ensemble d'exercices de mobilisation du membre à rééduquer, pour travailler la rapidité et l'amplitude du geste. L'interface haptique guide le bras de la personne le long de la bonne trajectoire, soit pour l'aider à reproduire le bon geste soit pour freiner son geste et renforcer le membre. Le côté ludique du système est assuré par des environnements virtuels en trois dimensions.

L'évaluation dans les centres de rééducation a permis d'engranger des critiques permettant de l'améliorer. Un deuxième système à quatre câbles, Kinéhaptique 2, permettant un volume de travail plus grand, a été développé en partenariat avec la société Haption, spin-off du CEA, et évalué dans des centres APPROCHE en 2007.

Le projet Brahma, mené en collaboration avec l'ISIR et l'université Paris Descartes) correspond à une autre approche qui vise à développer une orthèse, un « exosquelette » qui épouse le mouvement du bras en maîtrisant les mouvements du coude et de l'épaule.

Pour l'avenir, le LIST a en projet l'industrialisation du robot Kinéhaptique, l'amélioration des performances du bras embarqué sur AVISO, la mise en place de nouvelles fonctions sur le robot SAM, la diversification de la reconnaissance d'objets et des stratégies de saisie ou encore l'amélioration de l'interface homme machine. Une expérimentation à relativement grande échelle (20 robots) dans des appartements thérapeutiques de centres de rééducation

est en route, mais la robotique d'assistance restera orpheline tant que nous ne parviendrons pas à mettre en place un « écosystème » associant le laboratoire de conception, le fabricant, le distributeur réparateur, le prescripteur (assurances), et le financeur (assurance maladie, assureurs).

COMBIEN DE VENTES ?

Mais alors pourquoi les robots chirurgiens sont-ils si peu utilisés ? Pour Philippe Decq, Service de neurochirurgie, Hôpital Henri Mondor, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, *« on est face au problème de l'usage des technologies robotiques. Lors d'un congrès, un chirurgien était fier de montrer les performances d'une prothèse de bras chez un homme amputé de l'avant-bras. Celui-ci pouvait saisir toutes sortes d'objets. Mais quand je lui demandais s'il utilisait sa prothèse dans la vie quotidienne, il me répondit qu'il ne la « sortait » que dans les grandes occasions. Cette anecdote donne une idée de la difficulté d'usage des systèmes robotiques d'assistance, souvent incommodes ou mal adaptés. Da Vinci est un immense robot très encombrant qui certes peut permettre des opérations chirurgicales à distance et dans des endroits du corps que l'on ne peut atteindre facilement à la main, mais qui ne peut être utilisé couramment »*.

« Selon moi, la vraie question que les médecins doivent se poser est : pourquoi ai-je besoin de ces systèmes dans ma pratique ? Les robots sont souvent utiles pour réaliser ce que le médecin ne sait ou ne peut pas faire : analyser le mouvement, poser un diagnostic quantitatif, effectuer un geste chirurgical dans une région inaccessible, etc. »

Pour sa part Philippe Bidaud estime que *« Da Vinci est un système performant. Mais la difficulté à l'utiliser souligne la nécessité d'un processus permanent de réflexion entre chercheurs et chirurgiens. Cette fertilisation croisée des pratiques et des questionnements scientifiques doit viser non seulement à mettre au point des systèmes assurant la réalisation de gestes dextres mais aussi à les perfectionner ensuite. Ce qui manque souvent c'est la poursuite du dialogue une fois la technique mise au point, alors que le parcours de l'objet technique ne fait que commencer et doit être approprié par le corps médical pour être efficace »*.

« Deux approches qui peuvent paraître difficiles à concilier : soit l'on part d'une question médicale pour mettre au point un système, soit le chercheur souhaitera démontrer qu'un système robotique qu'il a développé a des applications en médecine. L'absence de rapprochement de ces approches autour des patients conduit souvent à des échecs de l'une comme de l'autre ».