

DES ROBOTS POUR AIDER LES MÉDECINS À MIEUX SOIGNER

Le chirurgien remplacé par une machine ? Intervenant au plus près des êtres humains, la robotique médicale suscite autant de questions que d'attentes. En pointe de ce domaine sensible, **Jocelyne Troccaz** dévoile ce qu'il en est, les dernières avancées et les défis à venir.

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciennes et académiciens analysent et apportent leur éclairage sur les grands enjeux du monde contemporain au travers de questions scientifiques qui font l'actualité.

Si on évoque un robot chirurgical, de nombreuses représentations peuvent venir à l'esprit : imaginez-vous un robot humanoïde capable de manipuler des instruments chirurgicaux avec dextérité et intelligence ? Ou bien voyez-vous une table d'opération futuriste bardée de capteurs et d'instruments automatiques qui vous inspecteraient, vous palperaient, vous transformeraient ? Ou cela résonnerait-il avec « le Voyage fantastique » d'Isaac Asimov, où des microrobots seraient capables de se déplacer dans des vaisseaux sanguins pour aller en toute autonomie traiter un anévrisme cérébral ou réparer une valve aortique ? Ces trois types d'images font entrevoir le robot interventionnel sous différents angles : assistant humanoïde, salle d'opération automatisée ou dispositif médical avancé. En d'autres termes, on y voit la fonction robotique incarner alternativement l'opérateur, le processus opératoire ou les instruments. Qu'en est-il de la réalité actuelle et du proche futur ?

DESSINE-MOI UN ROBOT

Il est important de préciser tout d'abord ce que l'on entend par « robot » car on utilise de plus en plus fréquemment ce terme pour désigner un automatisme

logiciel (robot conversationnel ou robot de trading, par exemple) (1). Ici, le robot est une machine physique capable de se déplacer et/ou de déplacer des « outils » pour réaliser une variété de tâches et qui peut s'adapter à des variations de l'environnement. Pour cela, le robot doit être couplé à des capteurs et l'information transmise par ceux-ci être traitée par des moyens informatiques. Les tâches sont réalisées en coopération avec des utilisateurs humains dans un environnement très contraignant : stérilité au bloc opératoire, champ magnétique dans l'imagerie par résonance magnétique (IRM), etc. Selon les dispositifs développés, la capacité d'adaptation est plus ou moins automatisée ; autrement dit, la prise de décision est plus ou moins distribuée entre le robot et son utilisateur.

Ce domaine de la robotique interventionnelle (chirurgie, radiothérapie, radiologie interventionnelle, etc.) est né il y a quatre décennies. Son développement a été rendu possible par des évolutions de la médecine et de la chirurgie en lien avec les grandes découvertes et révolutions technologiques des XX^e et XXI^e siècles. Pour mémoire, la première image scanner, celle d'un cerveau, a été acquise en 1972, le premier ordinateur a vu le jour en 1946 et le premier robot industriel est apparu au début des années 1960. Connecté à l'ordinateur, le scanner a permis de reconstruire une image tridimensionnelle de la zone anatomique observée.

Il ne fallut pas beaucoup plus d'une décennie pour moderniser le concept de neurochirurgie stéréotaxique (le repérage précis et l'accès mini-invasif à une cible cérébrale) en connectant l'ordinateur au bistouri par le biais de l'image et du robot. C'est ainsi



que, le 25 juin 1985, le « New York Times » publiait un article intitulé « A robot arm assists in three brain operations » relatant en détail la troisième expérience sur patient de l'utilisation d'un robot pour assister un geste interventionnel sous scanner au Memorial Hospital de Los Angeles. La France ne fut pas en reste puisque, au CHU de Grenoble, en mars 1989, un premier patient était opéré par le Pr Alim Benabid en neurochirurgie stéréotaxique grâce à l'assistance d'un robot développé au sein du laboratoire TIMC (en particulier par Stéphane Lavallée et Philippe Cinquin).

OS ET TISSUS MOUS

Une première génération de robots se développa donc avec des applications à la neurochirurgie stéréotaxique puis à l'orthopédie. La mise en place d'une prothèse de hanche ou de genou nécessite des coupes osseuses précises pour le positionnement des éléments de prothèse et la restauration des mouvements de l'articulation. La fonction du robot était donc de réaliser ces coupes osseuses selon un planning – une suite d'actions et leurs conditions de réalisation – préétabli par le chirurgien sur la base des images (radios ou scanner) du patient. À partir de ce planning, en tenant compte de la position du

DES SYSTÈMES CHERCHENT À PERMETTRE UN « SUIVI DE CIBLE » POUR QUE LE ROBOT S'ADAPTE AUX MOUVEMENTS DES ORGANES, À LA RESPIRATION DU PATIENT.

patient lors de l'intervention, le robot pouvait réaliser automatiquement cet « usinage » de la cavité osseuse en étant supervisé par le chirurgien. Le robot permet donc de faire le lien entre l'espace physique où se situe le patient et l'espace numérique où sont stockés les images et le planning.

En parallèle se diffusait la chirurgie mini-invasive dite laparoscopique, inventée en 1972 à Lyon par le Pr Philippe Mouret. Utilisant de petites incisions pour introduire les instruments, le chirurgien a recours à une caméra endoscopique (c'est-à-dire introduite dans la cavité opératoire) pour percevoir les organes et ses instruments, donc contrôler ses actions. Cette chirurgie, idéale pour les patients, n'est pas sans poser des problèmes aux médecins qui la pratiquent : leurs perceptions (visuelle et tactile) sont diminuées et les mouvements des instruments sont contraints par le point d'insertion dans le corps. L'idée d'utiliser un robot pour recouvrer de la perception et de la dextérité a donc vu le jour dans les années 1990. Au contraire des interventions de neurochirurgie ou d'orthopédie, dont le planning était de nature « géométrique » (atteindre un point précis dans une direction donnée, par exemple), et parce que les organes concernés sont mobiles et déformables, il n'était pas possible d'établir a priori un planning précis des mouvements et actions à effectuer.

C'est pourquoi on a recours à la téléopération : l'opérateur médecin déplace les outils portés par les bras robotiques au moyen de joysticks sophistiqués ; pour contrôler son geste, il a accès en temps réel à des images (endoscopiques ou radiologiques). Les mouvements envoyés au robot peuvent être « transformés » par l'ordinateur : par exemple, un centimètre du côté de l'opérateur peut devenir un millimètre du côté du robot et les tremblements peuvent être supprimés, ce qui est très utile pour la microchirurgie. Ce type de robot interventionnel téléopéré est le plus utilisé dans le monde.

MAIN DANS LA MAIN

On perçoit à travers ces exemples deux modes d'interaction de l'opérateur avec le robot : dans le premier cas, il programme le robot qui exécute une »

PROFIL
 Directrice de recherche au CNRS, laboratoire de recherche translationnelle et innovation en médecine et complexité (TIMC, université Grenoble-Alpes), **Jocelyne Troccaz** est membre de l'Académie des sciences. Ses travaux mondialement reconnus sur l'imagerie et la robotique médicales ont prouvé que cette dernière peut permettre aux cliniciens d'apporter de meilleurs soins aux patients.

EN FRANCE, C'EST EN 1989 QU'UN PREMIER PATIENT ÉTAIT OPÉRÉ EN CHIRURGIE DU CERVEAU GRÂCE À L'ASSISTANCE D'UN ROBOT.

DOMAINE TRÈS PROMETTEUR, L'ULTRAMINIATURISATION PERMET D'ENVISAGER DES DISPOSITIFS ROBOTISÉS NAVIGUANT DANS LE CORPS.

» action de façon automatique. Dans le second cas, il télécommande le robot. Un troisième mode est ce qu'on appelle la comanipulation : le robot porte l'instrument et l'opérateur tient ce dernier et essaie de le déplacer ; le robot « filtre » les déplacements proposés par l'opérateur de façon à respecter le planning, par exemple, pour éviter une zone anatomique qu'il ne faut pas léser. On pourrait assimiler la première forme d'interaction à la capacité de parking automatique d'une automobile ; la deuxième serait la conduite conventionnelle assistée d'un ABS et de la direction assistée ; le troisième mode serait à rapprocher du limiteur de vitesse adaptatif anticollision. Si l'on veut continuer à filer la métaphore automobile, il faut reconnaître que la robotique interventionnelle est loin de la voiture autonome ! Pourtant, nombre de systèmes cherchent à permettre un « suivi de cible » pour que le robot s'adapte à des mouvements des organes, notamment en lien avec



Allemagne, 2023. L'intégration des robots en chirurgie démultiplie la précision des interventions.

la respiration du patient. Mais, cette fonctionnalité relève davantage de l'ajustement dans des limites données que d'une réelle autonomie. Par ailleurs, des dispositifs avancés très spécialisés sont à l'étude, par exemple pour réaliser des sutures automatiquement. L'accès à une réelle autonomie décisionnelle des robots pose de nombreuses questions en matière de sûreté de fonctionnement dans ce contexte très critique et très réglementé qu'est la santé.

« DEUXIÈME VAGUE » DE L'IA

D'autres travaux récents concernent la conception de dispositifs pour la chirurgie endoluminale, c'est-à-dire utilisant les voies naturelles (tube digestif, voies respiratoires, vaisseaux sanguins, etc.). Les applications potentielles sont très nombreuses. C'est le champ de la robotique continue : le robot continu ne dispose pas d'articulations en nombre fini comme un bras mais est une structure déformable comme une trompe d'éléphant. La modélisation et le contrôle de ces dispositifs sont de véritables défis. Au-delà, l'ultraminiaturisation permet également d'envisager des dispositifs robotisés naviguant dans le corps : c'est un autre domaine extrêmement prometteur. L'analyse économique du côté des utilisateurs pourrait peut-être se satisfaire davantage de dispositifs très miniaturisés, à usage unique. Le coût des robots interventionnels est en effet un obstacle à leur démocratisation.

Pour conclure ces perspectives, revenons sur le lien aux images et plus généralement aux données. Le robot et son environnement informatique permettent, au-delà de l'assistance fournie, de collecter des données sur les interventions sous la forme de traces d'exécution des mouvements réalisés et des signaux et images captés (endoscopiques, par exemple). On parle de « surgical data science ». À l'heure de la « deuxième vague » de l'intelligence artificielle permise par l'apprentissage sur de grandes masses de données, le potentiel est énorme en matière de modélisation de la qualité des interventions et du développement d'assistances sensibles au contexte. Ainsi, un geste réalisé avec un robot téléopéré ou comanipulé pourrait être monitoré en temps réel pour déclencher des messages spécifiques ou des alarmes, dans un cadre d'usage standard ou dans un cursus spécifique d'apprentissage. Le lien entre médecins, scientifiques et ingénieurs est plus que jamais indispensable pour capter ces données, modéliser la qualité du geste et concevoir les outils de demain. ●

(1) Voir « Les robots, ces nouvelles machines », de Jean-Paul Laumond, dans « l'Humanité Dimanche » du 18 novembre 2021, en partenariat avec l'Académie des sciences et sur humanite.fr

EN SAVOIR PLUS

Le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

« La place des robots dans les processus de soin », de J. Troccaz et J.-P. Laumond, in « Médecine et Intelligence artificielle », B. Nordlinger, C. Villani et O. de Fresnoye (dir.), CNRS Éditions, 2022. En ligne sur le portail HAL Science ouverte : hal.science

« Les concepts », de J. Troccaz, in « La robotisation en chirurgie. État des lieux », rapport de l'Académie nationale de médecine, 2020. En ligne sur hal.science