



HAL
open science

La place des robots dans les processus de soin

Jocelyne Troccaz, Jean-Paul Laumond

► **To cite this version:**

Jocelyne Troccaz, Jean-Paul Laumond. La place des robots dans les processus de soin. Bernard Nordlinger, Cédric Villani et Olivier de Fresnoye. Médecine et Intelligence Artificielle, CNRS Editions, pp.243-252, 2022, 978-2-271-14151-4. hal-03646946

HAL Id: hal-03646946

<https://hal.science/hal-03646946>

Submitted on 20 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La place des robots dans les processus de soin

Jocelyne Troccaz¹, Jean-Paul Laumond²

Le numérique a depuis bien longtemps conduit à repenser les processus de soin. De simple outil de gestion administrative dans les années 1970, il est devenu un acteur crucial permettant l'imagerie 3D (notamment scanner et IRM), puis transformant peu ou prou toutes les pratiques des différentes spécialités. L'accès à des données désormais massives et multimodales, la seconde vague de l'intelligence artificielle ainsi que la multiplicité des objets connectés conduisent une fois encore à questionner les pratiques et à repositionner les acteurs du soin sur l'échiquier très mobile de l'information de santé. L'attrait des dispositifs numériques propres à aider le soignant, l'utilisateur du système de soin ou l'institution est extrêmement vaste.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la place des robots dans les processus de soin. Il est d'abord utile de revenir à la définition du robot dit « intelligent ». C'est une machine physique se déplaçant ou déplaçant ses effecteurs dans l'espace physique et y agissant. Cette machine doit être relativement versatile, programmable et capable de prendre en compte des variations, plus ou moins importantes, de son environnement pour y adapter sa tâche. Cela sous-entend la capacité à percevoir ces variations et à prendre des décisions. Cela implique donc que le robot est doté de capteurs et est en lien avec une représentation numérique explicite ou implicite de l'environnement et de sa tâche. Enfin, le robot médical agit dans un environnement humain. Il doit être capable d'interaction et garantir la sécurité des patients et des soignants. Il est important de noter que la robotique se distingue des systèmes d'information en général et de l'intelligence artificielle en particulier en ce qu'elle s'intéresse au rapport que peut entretenir avec le monde physique une machine commandée numériquement. Un robot est plus qu'un simple ordinateur. C'est une machine. Les résultats produits par un système d'information (par exemple, un logiciel de diagnostic médical) sont utilisés par un expert du domaine. Le logiciel en tant que tel ne prend pas de décision, il est une *aide à la décision*. Dans le cas de la robotique, il en va tout autrement. Le logiciel de commande du robot est « validé » par l'interaction attendue de la machine avec le monde physique et par son bénéfice clinique. Prenons deux exemples : dans le cas de la télé-opération, un logiciel transmet le mouvement des mains du chirurgien aux outils du robot. Sa « validation par la machine » est d'une tout autre nature qu'une validation par un expert humain avant toute prise de décision. Il est indispensable que le logiciel de commande du robot soit robuste et transmette correctement le geste du chirurgien. Si l'on considère maintenant l'exemple d'un robot qui réalise une cavité osseuse pour la pose d'une prothèse de hanche, la validation du processus complexe consistant à choisir la prothèse la plus adéquate, planifier sa position et son orientation par rapport à un scanner du patient, transférer ces informations au robot par rapport à la position courante du patient pendant l'intervention et enfin usiner cette cavité, est *in fine* attestée par la qualité de la pose de la prothèse et la capacité retrouvée du patient à utiliser sa hanche. En robotique, comme en aéronautique (penser au pilotage automatique d'un avion), le problème de la certification des logiciels est absolument central. Il s'ajoute aux multiples contraintes réglementaires et de certification du matériel. C'est une des raisons de la relative lenteur des avancées en matière de robotique rapportée à la rapidité de diffusion des systèmes d'information, et ce, indépendamment des domaines d'applications considérés.

Ici, nous considérons deux types de robots d'assistance médico-chirurgicale : ceux qui aident le praticien (chirurgien, radiologue interventionnel, radiothérapeute, etc.) dans la réalisation de son geste et ceux qui interagissent avec le patient pour sa prise en charge ou sa rééducation. Nous excluons ici les robots contribuant au processus de soin tels que systèmes de déstockage de médicaments, systèmes de convoyage intra-hospitaliers, robots dans les services de stérilisation, robots dans les laboratoires de biologie, etc. Nous excluons également les dispositifs implantables, organes artificiels ou prothèses instrumentées bien

¹ Directrice de recherche au CNRS, Laboratoire TIMC, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, VetAgroSup

² Directeur de recherche Emérite au CNRS, Unité ENS-CNRS-INRIA-PSL 8548

qu'évidemment tous ces dispositifs soient tout à fait dignes d'intérêt et pourraient relever des thématiques de cet ouvrage.

Le robot interventionnel

Un peu d'histoire

C'est certainement la capacité de matérialiser une information numérique et l'idéal de précision qu'il incarnait qui ont ouvert au robot la porte de l'hôpital au début des années 1980 en neurochirurgie. Le 25 juin 1985, le *New York Times* publiait un article³ intitulé « A robot arm assists in 3 brain operations » relatant la troisième expérience sur patient de l'utilisation d'un robot pour assister un geste interventionnel sous scanner. Ces expérimentations cliniques étaient menées au Memorial Hospital de Los Angeles par Yin San Kwoh, radiologue. Le robot, un PUMA 200 de la société Unimation, relié à un ordinateur et installé dans l'enceinte d'un scanner, positionnait un guide permettant au médecin de diriger son geste pour un accès mini-invasif à une cible cérébrale définie dans les images 3D. Une série de 22 patients était évoquée en 1988 dans une publication de robotique⁴. À la même époque, Patrick Kelly, neurochirurgien à la Mayo Clinic de Rochester, réalisait des interventions de neurochirurgie stéréotaxique assistées par ordinateur : le dispositif utilisé combinait un cadre stéréotaxique motorisé et un faisceau laser, tous deux positionnés et commandés informatiquement à partir des données d'une imagerie tridimensionnelle, scanner ou IRM. Si ce dispositif⁵ marqua peut-être moins les esprits que le bras robotisé à 6 degrés de liberté utilisé pour une intervention dans un scanner à rayons X, il préfigurait déjà parfaitement l'intégration aux instruments chirurgicaux de fonctions robotiques sophistiquées. Un autre article⁶ de 1986 rapportait déjà une série de 83 procédures sur 78 patients. En France, à Grenoble, en mars 1989, un premier patient était opéré grâce à l'assistance d'un robot par Alim Benabid en neurochirurgie stéréotaxique. Il a été le premier de plusieurs dizaines de milliers d'autres opérés grâce à l'assistance de ce prototype développé au sein du laboratoire TIMC⁷, puis par le système Neuromate, issu de l'industrialisation de ce concept.

Cet exemple pionnier de la neurochirurgie, puis peu après, ceux de la chirurgie orthopédique assistée par robot (par exemple Robodoc⁸ qui usinait une cavité osseuse pour la pose d'une prothèse de hanche) sont tout à fait représentatifs d'une époque où le tissu industriel était métamorphosé par l'automatisation. Par la suite, l'évolution des pratiques cliniques a fait évoluer les besoins et les modes d'interaction entre robot et opérateur humain.

Quelques éléments d'interaction humain-robot

De nombreux dispositifs robotiques sont utilisés en clinique ou sont en cours de développement. Le lecteur intéressé peut prendre connaissance d'un état de l'art récent⁹ relativement exhaustif ou de se reporter à un rapport¹⁰ de l'Académie nationale de chirurgie pour une vision plus clinique. Trois types d'interaction principaux peuvent néanmoins être décrits : on parle de robots actifs, de robots semi-actifs ou comanipulés et de robots télé-opérés. Robodoc est un *robot actif* : moyennant une étape préliminaire de localisation par

³ *New York Times*, « A robot arm assists in 3 brain operations », 25 juin 1985.

⁴ Kwoh Y. S., Hou J., Jonckheere E. et Hayati S. « A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. » *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 35(2), 1988, 153-160.

⁵ Kall B. A., Kelly P. J. et Goerss S. J. « Interactive stereotactic surgical system for the removal of intracranial tumors utilizing the CO2 laser and CT-derived database. » *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 32(2), 1985, 112-116.

⁶ Kelly P. J., Kall B. A., Goerss S. et Earnest F. « Computer-assisted stereotaxic laser resection of intra-axial brain neoplasms. » *Journal of Neurosurgery*, 64(3), 1986, 427-439.

⁷ Lavalley, S., Troccaz, J., Gaborit, L., Cinquin, P., Benabid, A. L., et Hoffmann, D. Image guided operating robot: a clinical application in stereotactic neurosurgery. In *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 618-619). IEEE Computer Society

⁸ Paul H. A., Bargar W. L., Mittlestadt B., Musits B., Taylor R. H., Kazanzides P., Zuhars J., Williamson B. et Hanson W. « Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty. » *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 285, 1992, 57-66.

⁹ Troccaz J., Dagnino G. et Yang G.-Z. « Frontiers of Medical Robotics: From Concept to Systems to Clinical Translation. » *Annual Review of Biomedical Engineering*, 21(1), 2019, 193-218.

¹⁰ *La robotisation en chirurgie : état des lieux*, Rapport de l'Académie nationale de chirurgie, 2020, sous la présidence du Pr. X.Martin, <https://www.academie-chirurgie.fr/admin/uploads/media/photo/0001/03/8af96f0ed5d3071891bac8ab31ca7dee34a6e287.pdf>

rapport au patient, il réalise la tâche pré-planifiée d'usinage de la cavité osseuse de façon autonome, sous contrôle d'informations venant d'un capteur de force¹¹ et sous supervision du chirurgien. À l'autre extrémité du spectre, on trouve les *robots télé-opérés* : l'opérateur humain pilote à chaque instant les mouvements des outils au moyen d'interfaces haptiques (avec ou sans retour d'effort) ; les mouvements sont éventuellement faiblement transformés (filtrage, facteur d'échelle). C'est la coelochirurgie, pour laquelle les instruments et une optique sont introduits dans le corps par un ou plusieurs orifices, qui a suscité le développement de ces robots pour venir compenser les pertes de perception directe et de dextérité des chirurgiens dues à cette modalité mini-invasive vidéo-assistée. Plus récemment ces approches ont été également développées pour la radiologie interventionnelle où les interventions endoluminales (intravasculaires¹² par exemple). Ces gestes sous contrôle d'images (radiologiques par exemple) posent en effet de nombreux défis (lisibilité des images projectives, irradiation potentielle, contrôle de l'outil distal dans un environnement complexe et ultra-contraint, etc.). Entre ces deux extrêmes (robot actif et robot télé-opéré), on trouve un niveau d'interaction intermédiaire où le robot contraint les déplacements possibles d'outil manipulé directement par le chirurgien. On parle de robots semi-actifs (les exemples de neurochirurgie évoquées précédemment) ou plus généralement de comanipulation. Ainsi un robot pourra contraindre l'outil déplacé par le chirurgien à rester dans une zone prédéfinie dans le planning opératoire tout en laissant une liberté au chirurgien pour adapter son geste à ce qu'il perçoit en temps réel.

L'autonomie des robots interventionnels

Il convient de rappeler que ces dispositifs robotiques furent conçus pour être intégrés dans une boucle de « perception – décision – action » ayant pour finalité la réalisation optimale d'un objectif clinique diagnostique ou thérapeutique. Le robot n'est ainsi que la composante instrumentale finale d'un processus visant à planifier une intervention optimale, pour le patient considéré, sur la base d'informations le concernant et de connaissances *a priori*. La prise de décision relative au geste concerne tout à la fois des aspects stratégiques et sa réalisation tactique. Elle est à l'heure actuelle largement humaine.

C'est lorsque la robotique s'est intéressée à des interventions sur tissus anatomiques dits « mous », déformables et mobiles, que le paradigme de l'automatisation reposant alors sur une pré-planification a fait place à la télé-opération. Les capacités d'adaptation du robot à son environnement étaient mises en défaut par des processus difficilement prédictibles et modélisables. À l'heure actuelle, les robots actifs ont évolué dans leur capacité d'adaptation automatique à la tâche et c'est certainement un de leurs avantages principaux pour réaliser un suivi de cible, en temps réel, automatisé. Quand Robodoc nécessitait que l'os sur lequel on intervenait soit immobilisé, le robot actif Cyberknife (Accuray Inc.) utilisé pour le traitement de radiothérapie s'adapte automatiquement à la position d'une tumeur qui bouge avec la respiration du patient. Ce système est basé sur la connexion du robot avec différents capteurs et avec un modèle appris, liant les bougés internes de la cible à des bougés de marqueurs externes¹³. Ceci permet de déduire la position de la tumeur en suivant la position du thorax du patient et de modifier, en temps réel, la trajectoire du robot pour la réalisation conforme du traitement. D'autres approches d'asservissement visuel ont été également introduites, liant la commande bas niveau du robot à des informations visuelles fournies par une imagerie médicale peropératoire (endoscopie, échographie par exemple). Dans ces nouveaux dispositifs le robot dispose d'une autonomie décisionnelle pour adapter son geste à l'environnement afin de permettre de réaliser la stratégie pré-planifiée. Cet asservissement visuel peut être mis en œuvre également pour des robots comanipulés¹⁴ ou dans de la télé-opération avancée par exemple pour une compensation automatique de mouvements respiratoires ou cardiaques¹⁵.

¹¹ Notons qu'il s'agit d'une simple « commande gardée » (le franchissement d'un seuil de force entraîne l'arrêt du mouvement en cours) et non d'une « commande en force » qui consisterait à adapter le mouvement pour respecter une consigne de force.

¹² Riga C., Bicknell C., Cheshire N. et Hamady M. « Initial clinical application of a robotically steerable catheter system in endovascular aneurysm repair. » *Journal of Endovascular Therapy : An Official Journal of the International Society of Endovascular Specialists*, 16(2), 2009, 149-153.

¹³ Schweikard A., Shiomi H. et Adler J. « Respiration tracking in radiosurgery. » *Medical Physics*, 31(10), 2004, 2738-2741.

¹⁴ Poquet C., Mozer P., Morel G. et Vitrani M. A « A novel comanipulation device for assisting needle placement in ultrasound guided prostate biopsies. » In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, nov. 2013, pp. 4084-4091. IEEE.

¹⁵ Joinié-Maurin M., Bayle B., Barbé L. et Gangloff J. « Force feedback teleoperation with physiological motion compensation. » *IFAC Proceedings Volumes*, 42(16), 2009, 425-430.

Dans une courte publication de 2017¹⁶, les auteurs proposent une classification de l'autonomie des robots médicaux allant d'un extrême sans aucune autonomie (niveau 0) dans lequel sont classés les robots de téléopération à un opposé totalement automatisé (niveau 5) pour lequel les décisions stratégiques et tactiques et leur réalisation seraient à la charge d'une machine sans aucune supervision humaine. Schématiquement, dans les trois premiers niveaux, la planification et l'adaptation de la tâche aux variations de l'environnement sont à la charge de l'utilisateur humain alors que dans les 3 niveaux « supérieurs » ils sont partiellement ou totalement à la charge de la machine. L'état de l'art se cantonne encore pour l'essentiel aux niveaux 0 à 2 voire plus rarement (cas du Cyberknife) au niveau 3 d'une autonomie dite conditionnelle.

Les robots d'assistance au patient

À côté des robots directement partie prenante des interventions chirurgicales, on trouve de nombreux dispositifs robotiques destinés à accroître l'autonomie du patient.

Assistance à la mobilité

Dès les débuts du développement de la robotique mobile à partir des années 1970, le fauteuil roulant automatisé a suscité de nombreuses recherches. Conçus pour améliorer l'autonomie de déplacement des paraplégiques, les premiers dispositifs ont consisté à substituer l'énergie de propulsion musculaire par l'énergie électrique. Le contrôle du mouvement (vitesse de déplacement et choix de la direction) se fait par l'intermédiaire d'un joystick. Des recherches tentent d'étendre ce mode d'interaction à des interfaces basées sur la détection et le contrôle d'ondes cérébrales. Opérationnelles dans quelques laboratoires, ces avancées devraient permettre l'appropriation de ces techniques par des sujets tétraplégiques. Pour l'heure, elles ne sont pas suffisamment probantes pour envisager leur déploiement industriel. Quant au robot mobile entièrement autonome, c'est à dire capable de calculer automatiquement la trajectoire à suivre dans un environnement encombré d'obstacles à partir de la seule donnée du but à atteindre, la technologie existe bien. Elle est opérationnelle dans des domaines tels que la logistique. En revanche son application pour l'aide à la mobilité des personnes reste encore, et pour longtemps, un sujet de recherche à part entière.

Les exosquelettes sont des dispositifs mécaniques épousant le squelette humain dans le but de faciliter le mouvement par la prise en charge des masses à transporter. La technologie commence à être déployée dans l'industrie et dans l'infanterie militaire. Elle permet de prévenir les troubles musculo-squelettiques des ouvriers et d'augmenter les capacités de résistance des fantassins. En revanche, son application à la verticalisation et à l'aide à la marche des patients paraplégiques reste un défi pour la recherche. En effet, dans le cas des applications industrielles et militaires, le mouvement de la machine est induit par le mouvement de l'homme, mouvement dont n'est pas capable le patient paraplégique. Dans ces conditions l'exosquelette requiert un degré d'automatisation qui constitue encore aujourd'hui un objet de recherche. En revanche les exosquelettes sont d'ores et déjà opérationnels dans des tâches de rééducation : ils permettent de répéter un mouvement à l'envi et de stimuler ainsi l'activité musculaire d'un patient sans recourir à la partie répétitive des services d'un kinésithérapeute.

Assistance à l'autonomie de la personne

Depuis la fin des années 2000, on voit apparaître sur le marché des robots ludiques tels le célèbre petit robot humanoïde Nao de la société Aldebaran, rachetée en 2012 par la société japonaise Softbank. Initialement dédiés au système éducatif, ces robots ont trouvé des applications dans le domaine de la santé et d'aide à la personne. Ils sont utilisés à des fins thérapeutiques auprès d'enfants atteints d'autisme. Dans les EHPAD, ils servent de support à des activités récréatives. En revanche la promesse d'un robot anthropomorphe capable de partager la vie d'un patient, de subvenir aux besoins élémentaires de son quotidien afin de lui permettre un maintien à domicile, est très largement irréaliste. En dehors de quelques rares laboratoires de recherche, dans des contextes expérimentaux bien maîtrisés, il n'existe pas, aujourd'hui, de robots capables de seulement servir un verre d'eau à une personne. La robotique de service vue sous l'angle du robot universel

¹⁶ Yang G. Z., Cambias J., Cleary K., Daimler E., Drake J., Dupont P. E., ... et Taylor R. H. « Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. » *Science Robotics*, 2(4), 2017, 8638.

factotum n'a pas d'avenir. Elle est d'ores et déjà supplantée par la domotique et le développement des objets et dispositifs connectés, chacun remplissant une fonction particulière, comme le lit intégrant des capteurs de pression ou le système de levage par câbles permettant la transition d'une position couchée à une position assise, voire le transport de la personne dans une pièce.

Conclusion

On le voit donc dans ces deux applications de la robotique pour la santé, le robot autonome et anthropomorphe, médecin ou assistant de vie, n'est pas encore né. L'intelligence artificielle a pourtant déjà infiltré ce cadre applicatif. Si le robot chirurgical n'existe pas, de nombreux travaux visent à modéliser le geste chirurgical pour pouvoir l'analyser automatiquement, le reconnaître, le monitorer¹⁷. Les applications immédiates sont la formation des chirurgiens, la fourniture d'une aide contextuelle adaptée à leurs actions ou la détection d'événements indésirables. Mais on pressent bien que cette étape est également un préalable à l'existence de robots autonomes pour la chirurgie. La question se pose cependant de la nécessité de cette automatisation. Un robot se déplaçant sur Mars doit être autonome par nécessité. Il convient certainement d'identifier les applications cliniques où cette nécessité s'imposerait. On peut penser aux dispositifs implantables opérant au long cours dans le corps des patients, comme le cœur artificiel. Néanmoins ces dispositifs tiennent plus de l'automatisme que de l'autonomie. Un cœur artificiel ne prend pas de décision. Nous faisons nôtre la remarque de Jean Dubousset : en dernier ressort, « la décision sera toujours humaine, même si elle aboutit à une action automatique, car celle-ci sera programmée par l'intelligence humaine¹⁸ ».

¹⁷Maier-Hein L., Vedula S. S., Speidel S., Navab N., Kikinis R., Park A., Eisenmann M., Feussner H., Forestier G., Giannarou S., Hashizume M., Katic D., Kenngott H., Kranzfelder M., Malpani A., März K., Neumuth T., Padoy N., Pugh C., Shoch N., Stoyanov D., Taylor R., Wagner M., Hager G. et Jannin P. « Surgical data science for next-generation interventions. » *Nature Biomedical Engineering*, 1(9), 2017, 691-696.

¹⁸ Communication personnelle.