HAL
open science

Quelques Problèmes de Conception et Commande de Robots Médicaux

Etienne Dombre, Philippe Poignet, Gilles Duchemin, François Pierrot

To cite this version:

Etienne Dombre, Philippe Poignet, Gilles Duchemin, François Pierrot. Quelques Problèmes de Conception et Commande de Robots Médicaux. Mechanics & Industry, 2003, 4 (5), pp.559-563. 10.1016/j.mecind.2003.07.002 . lirmm-00269631v2

HAL Id: lirmm-00269631

https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00269631v2

Submitted on 26 Nov 2007

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.

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
Mécanique & Industries 4 (2003) 559–563

Quelques problèmes de conception et commande de robots médicaux

Some design and control problems in medical robotics

Etienne Dombre [a,*], Philippe Poignet [a], Gilles Duchemin [a,b], François Pierrot [a]

[a] *LIRMM, 161, rue Ada, 34392 Montpellier cedex 5, France*
[b] *SINTERS S.A., BP 1311, 31106 Toulouse cedex 1, France*

Reçu le 31 mars 2003 ; accepté le 5 juillet 2003

Résumé

La robotique permet à la fois à la chirurgie d'être moins invasive et au chirurgien d'être plus performant, l'incidence pour le patient se traduisant notamment en termes de durée d'hospitalisation, de meilleur confort post-opératoire, de minimisation des risques encourus. La robotique chirurgicale est multidisciplinaire en ce sens qu'elle met les sciences de l'ingénieur au service de la médecine. Son développement peut désormais être considéré comme inexorable dans la prochaine décennie. Cet article présente, au travers de deux exemples concrets, quelques problèmes liés à la conception et à la commande de ces systèmes.
© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Robotics is proven to be a very promising tool for less invasive surgery and for improving surgeon performance. The benefit for the patient is a shorter and more comfortable post-operative recovery period, and less risks during surgery. Medical robotics requires very broad engineering skills to cope with very complex surgical constraints. It now became a reality and is very promising for the next future. Based on two practical experiences of the authors, this paper presents some problems related with the design and control of such systems.
© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Robotique médicale ; Conception ; Commande

Keywords: Medical robotics; Design; Control

1. Introduction

La robotique médicale vise à améliorer la précision et la reproductibilité du geste médical tout en conservant au chirurgien ses prérogatives en matière de décision et de contrôle de l'action. Elle s'appuie sur une coopération étroite entre le chirurgien et le robot. Depuis maintenant une dizaine d'années, un certain nombre de robots médicaux sont apparus sur le marché : les spécialités concernées ont tout d'abord été la neurochirurgie (Neuromate [1], PathFinder [2]) et la chirurgie orthopédique (Robodoc [1]). Plus récemment, il est apparu que la robotique pouvait jouer un rôle important dans le développement d'une chirurgie moins invasive utilisant des techniques endoscopiques, notamment en chirurgie abdominale et en chirurgie cardiaque.

La robotique médicale se distingue de la robotique industrielle pour plusieurs raisons :

- les interactions incontournables robot/patient et robot/médecin imposent des contraintes très fortes en matière de sécurité,
- les interfaces homme/machine doivent être tout particulièrement ergonomiques pour rendre transparente au médecin l'utilisation du robot,
- la spécificité de chaque patient et de chaque pathologie fait qu'aucune tâche n'est répétitive. La boucle « perception–décision–action » chère aux roboticiens prend ici tout son sens. L'action est réalisée par un robot qui exécute une stratégie opératoire planifiée. La planification/décision pré-opératoire, voire per-opératoire,

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : dombre@lirmm.fr (E. Dombre).

1296-2139/$ – see front matter © 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.
doi:10.1016/j.mecind.2003.07.002

Nomenclature

F_x, F_z	forces	N
${}^{E}H_{E}^{d}$	consignes en efforts. Vecteur à 6 composantes (3 forces, 3 moments)	
M_x, M_y	moments	N·m
S	matrice de sélection des efforts (6×6) diagonale. Chaque terme de la diagonale est nul ou égal à 1 (sans unité)	

s'appuie sur des modèles de la zone d'intérêt. Ces modèles sont élaborés à partir d'informations pouvant provenir de plusieurs modalités (IRM, scanner, radiologie, échographie, imagerie nucléaire, ...),

- le robot, appelé aussi système de guidage (du geste du chirurgien), doit offrir des fonctionnalités spécifiques, et notamment réaliser des mouvements référencés à des informations capteurs (positions, force, vision). Il doit être transportable aisément, de dimensions réduites, facilement manipulable manuellement pour répondre aux exigences d'une salle d'opération : encombrement minimum, facilité de mise en œuvre.

Pour illustrer ce domaine en plein essor, ses spécificités et ses contraintes, on présente dans cet article deux applications : la première est un robot que nous avons développé pour le prélèvement de peau en chirurgie réparatrice ; la seconde traite de la chirurgie endoscopique minimalement invasive.

2. Robot de prélèvement de peau

En chirurgie réparatrice (brûlés, orthopédie, ...), le chirurgien est amené à réaliser des greffes de peau : pour ce faire, il prélève sur une zone saine du patient des lambeaux d'épiderme de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur grâce à un « dermatome » (instrument dont le principe de fonctionnement est le même que celui d'une tondeuse à barbe). Les lambeaux sont ensuite greffés sur la zone brûlée ou sur la plaie à recouvrir. Le prélèvement proprement dit est difficile à réaliser car il nécessite de maintenir un contact régulier du dermatome avec la peau tout en exerçant un effort important (de l'ordre de 100 Newtons). On a montré qu'un robot pouvait assister de façon efficace des praticiens qui ne réalisaient pas quotidiennement ce geste : le « dermatome », le même que celui utilisé manuellement par le chirurgien, est fixé sur le robot, et c'est le robot qui assure le contrôle très précis de sa pression sur la peau et la régulation de sa vitesse d'avancement.

Après une étude de faisabilité sur animal, qui a permis de concevoir (cinématique) et de dimensionner (longueur des segments, débattements articulaires, vitesses, efforts) un robot répondant aux exigences d'une utilisation sécurisée et fiable en bloc opératoire, un prototype de robot—le robot DERMAROB—a été spécifié par le LIRMM, en étroite collaboration avec le Service des Brûlés de l'Hôpital Lapeyronie (Montpellier), et réalisé par la Société SINTERS (Toulouse). Il est actuellement en phase de validation sur animal [3,4].

Le robot (Fig. 1) est monté sur un châssis mobile, ce qui facilite son déplacement dans la salle d'opération et entre les services de l'hôpital. Les différents organes de commande (alimentations pour les moteurs et résolveurs du bras, interface homme–machine, carte d'axes et variateurs, PC, cartes des différents périphériques) sont placés à l'intérieur d'une armoire de commande portée par un châssis. L'architecture

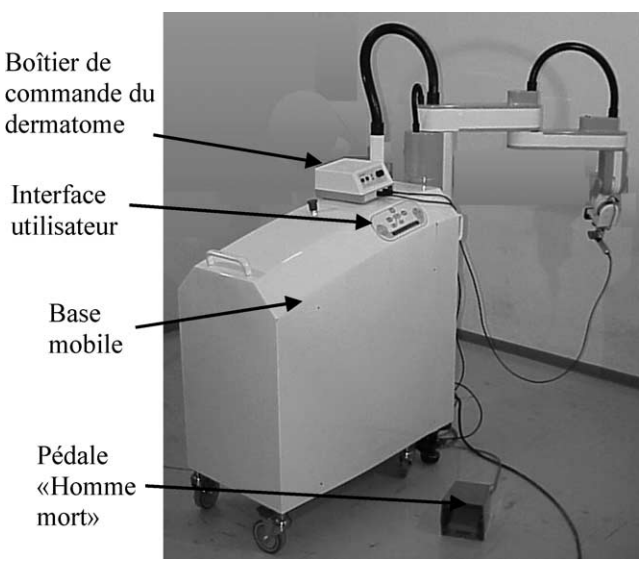

Fig. 1. Le robot DERMAROB.

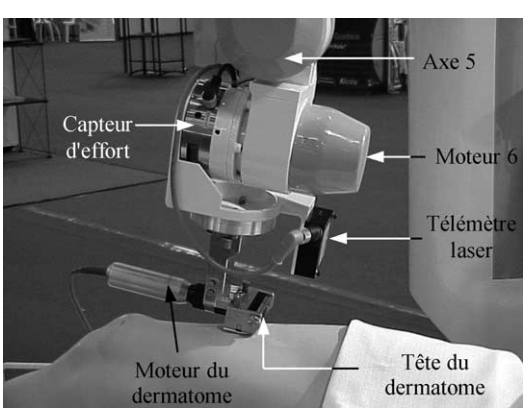

Fig. 2. Le poignet à axes non concourants et le dermatome.

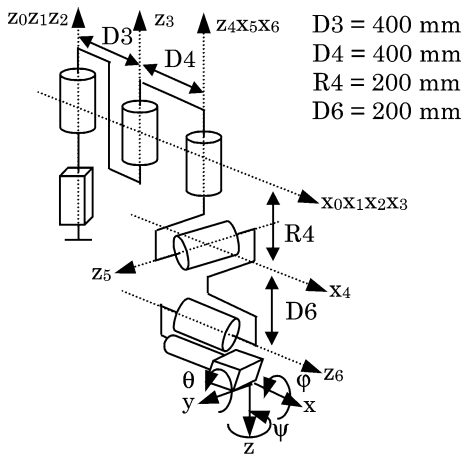

Fig. 3. Cinématique de DERMAROB et dimensions des segments.

du bras est de type SCARA. Pour des raisons de sécurité, l'architecture du poignet est différente de ce que l'on rencontre sur les robots industriels : les axes sont non concourants (Fig. 2), ceci afin de rejeter les singularités hors du volume de travail utilisé. La cinématique du robot, qui possède 6 degrés de liberté, est décrite sur la Fig. 3.

Comme indiqué sur la Fig. 2, le poignet est équipé d'un capteur d'effort 6 axes permettant le contrôle de l'effort exercé sur la peau lors du prélèvement. Il est placé à l'extrémité du poignet entre le dermatome et le dernier axe du robot. Un télémètre laser a été ajouté pour contrôler plus finement l'assiette du dermatome.

Le schéma de commande est du type commande externe hybride force-position (Fig. 4). Il contient deux boucles imbriquées. La première réalise une commande en position articulaire « classique » : le modèle géométrique inverse (MGI) transforme les consignes de position dans l'espace opérationnel (issues du générateur de mouvement) en consignes articulaires pour la carte d'axes. Ces consignes peuvent être modifiées dans l'espace opérationnel par la deuxième boucle qui est une boucle de commande en effort. Les consignes en effort ${}^{E}H_E^d$ dépendent du mode de fonctionnement choisi (apprentissage ou automatique). En mode apprentissage par exemple, le chirurgien déplace le robot manuellement pour lui « montrer » le point de départ du prélèvement à réaliser et le point d'arrivée. Les 6 composantes de ${}^{E}H_E^d$ doivent alors être nulles pour que le robot « suive » le chirurgien de façon transparente. La matrice de sélection S dépend des directions que l'on veut commander en force et en moment. En mode apprentissage, toutes les directions sont sélectionnées. En mode automatique, seule la force F_z (normale à la peau) est commandée, ainsi que les moments M_x et M_y.

Les principales avancées scientifiques en relation avec ce projet concernent :

- la conception d'un poignet sans singularités, donc sûr de fonctionnement,
- la mise en œuvre d'une commande hybride force-position du dermatome,
- la modélisation du contact dermatome-peau en vue d'adapter les paramètres de la loi de commande aux caractéristiques propres du patient,
- l'intégration du système en respectant des contraintes fortes en matière de sécurité et d'ergonomie de l'interfaçage homme/machine.

Cette étude a été financée par la Région Languedoc-Roussillon et le Ministère de la Recherche dans le cadre d'un contrat de plan Etat-Région (1999–2001).

3. Chirurgie minimalement invasive

Une opération est minimalement invasive en ce sens que l'abord chirurgical se fait au travers de petites incisions et non « à ciel ouvert ». Pour le chirurgien, la vision directe du site opératoire est remplacée par une image 2D sur un écran *via* un endoscope, avec les limitations que cela induit : éclairement imparfait, zones d'ombre, perception du relief difficile, champ de vision limité avec des risques

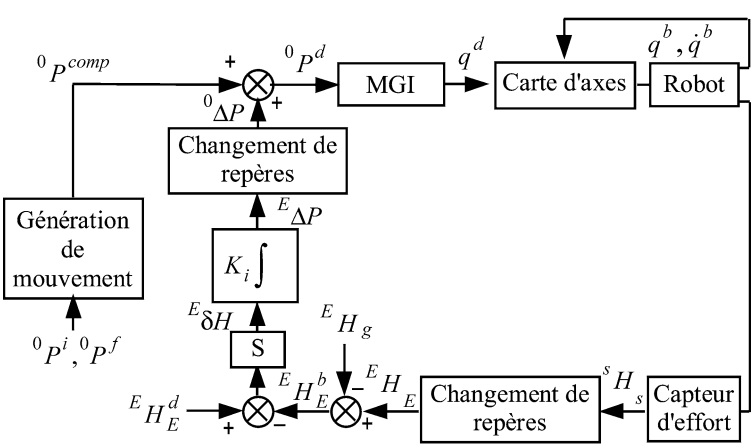

Fig. 4. Commande en position-force de DERMAROB.

d'occlusion. Les instruments chirurgicaux utilisés offrent les mêmes fonctionnalités que les instruments conventionnels. Ils sont fixés à l'extrémité d'un tube (typiquement de 300 mm de longueur et de ∅10) et sont introduits à l'intérieur du corps du patient au travers d'un trocart. On comprend bien qu'avec un tel montage, les mobilités de l'instrument sont réduites et que la perception du chirurgien des interactions de l'instrument avec les tissus est affectée par les frottements au niveau du trocart. Si les techniques minimalement invasives sont dorénavant mises en œuvre dans la plupart des interventions en chirurgie laparoscopique (abdominale), ce n'est pas le cas en chirurgie cardiaque. Pour y parvenir, il faudra notamment améliorer les retours visuel et haptique, et ajouter des mobilités intracavitaires. C'est en ce sens que la robotique est très prometteuse et incontournable.

Actuellement, on trouve sur le marché deux robots porte-endoscope : AESOP de Computer Motion [5] et EndoAssist de Armstrong Healthcare [2]. Le chirurgien peut commander lui-même ces dispositifs par différentes interfaces (vocale par exemple, mouvements de tête, ...). Deux systèmes Maître–Esclave de chirurgie mini-invasive sont également opérationnels : les robots Zeus™ de Computer Motion [5] et da Vinci™ d'Intuitive Surgical [6]. Ce sont des systèmes dédiés avec lesquels plusieurs équipes commencent à avoir de l'expérience en chirurgie laparoscopique. Le chirurgien manipule le bras esclave depuis un poste maître lui fournissant des dispositifs d'interaction (bras maîtres) et de contrôle (vision endoscopique). D'autres systèmes sont en cours de développement, comme RTW [7], Artemis [8] et EndoXiRob [9]. EndoXiRob est un projet français financé par le Réseau National des Technologies de la Santé (RNTS), qui devrait présenter des avancées importantes par rapport à l'existant (en termes d'encombrement, de dextérité, de miniaturisation des outils, d'immersion, de facilité de mise en œuvre, de coût, ...). Au plan national, on mentionnera aussi le projet RNTS AGEND, qui s'intéresse à la conception d'instruments d'endoscopie multi-modaux (vision et échographie) supportés par des gaines actives intégrant des microsystèmes, ainsi que le projet MARGE du programme ROBEA [10] du CNRS dont les objectifs sont la modélisation, l'apprentissage et la reproduction du geste endochirurgical au travers de mécanismes polyarticulés commandés de façon transparente [11].

Sur le plan de la mécanique, outre les exigences déjà mentionnées en introduction, l'une des difficultés est de définir une cinématique capable de satisfaire la contrainte de passage de l'instrument par un point fixe (le trocart) tout en assurant des débattements angulaires de l'instrument importants (Fig. 5). Il existe trois solutions [12] :

(i) la cinématique comporte un double parallélogramme (Fig. 6) comme sur le da Vinci™. Le placement du robot doit être tel que le premier axe de rotation du robot passe par le point fixe ;

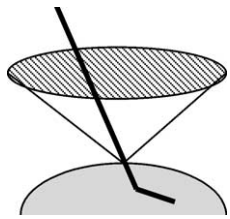

Fig. 5. Passage de l'instrument par un point fixe (trocart).

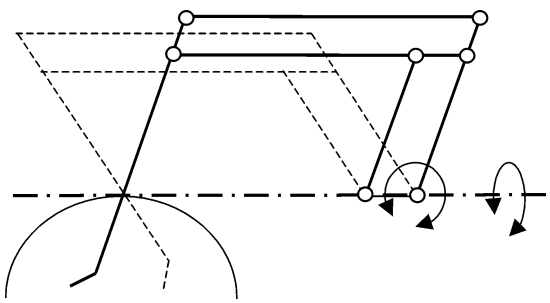

Fig. 6. Solution par double parallélogramme.

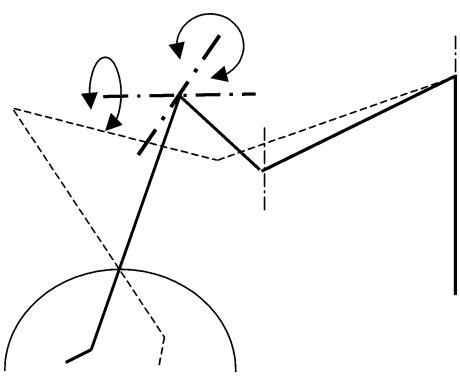

Fig. 7. Solution par articulations redondantes passives.

(ii) le bras est redondant avec deux articulations rotoïdes passives à son extrémité (Fig. 7) comme sur le Zeus™. L'orientation du porte-instrument est commandée par les efforts de contact dans le trocart, ce qui exige de minimiser les frottements des articulations passives ;

(iii) le bras est redondant mais toutes les articulations sont actives. Le passage de l'instrument par le point fixe est assuré par une commande appropriée. L'avantage de cette dernière solution est qu'elle ne nécessite pas de développer une cinématique particulière. Elle est validée sur la Fig. 8 (le point fixe est matérialisé par les 4 fils) avec un robot à 7 degrés de liberté pour des tâches simples de suivi de droite, cercle, hélice [13,14]. Le degré de liberté manquant peut être fourni par un axe externe ou par un axe embarqué à l'extrémité du robot.

Les autres difficultés liées à la conception de ces systèmes sont les suivantes :

– minimisation des frottements afin d'avoir une mécanique réversible et des retours haptiques réalistes,

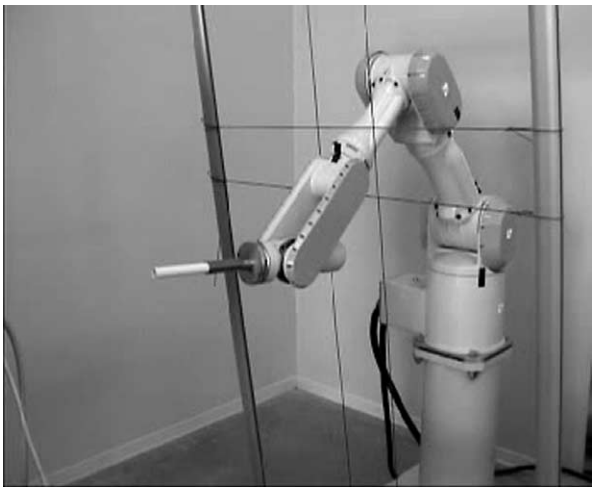

Fig. 8. Solution par articulations redondantes actives.

– minimisation des inerties pour avoir une transparence d'utilisation,
– conception du poignet porte-instrument avec au moins deux degrés de mobilité, compact, télé-commandable, facilement interchangeable, intégrant si possible un capteur d'effort à son extrémité.

4. Conclusion

La robotique médicale est maintenant une discipline à part entière qui nécessite toutes les compétences des sciences de l'ingénieur. Au travers des deux exemples évoqués, nous avons mis en évidence les nouvelles problématiques qui s'ouvrent en termes de conception mécanique (nécessité de développer des systèmes totalement transparents pour l'utilisateur, sans frottement ; miniaturisation des parties intracavitaires) et d'automatique (nécessité de restituer au chirurgien et au robot des informations les plus réalistes possibles sur les interactions de l'instrument chirurgical avec les tissus ; nécessité d'automatiser certaines fonctions pour améliorer les performances du chirurgien ; nécessité de maîtriser la coopération homme/machine). Des projets ambitieux ont vu le jour au plan international mais aussi national, des efforts importants ayant été consentis par les pouvoirs publics pour son développement.

Références

[1] http://www.robodoc.com/eng/.
[2] http://www.armstrong-healthcare.com/.
[3] E. Dombre, P. Poignet, F. Pierrot, G. Duchemin, L. Urbain, Intrinsically safe active robotic systems for medical applications, in : Proc. 1st IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environment, Seoul, May 21–22, 2001, Paper III-4.
[4] G. Duchemin, E. Dombre, F. Pierrot, P. Poignet, Robotized skin harvesting, in : Proc. 8th Int. Symp. on Experimental Robotics, ISER'02, Sant'Angello d'Ischia, Italy, July 8–11, 2002, Paper #30.
[5] http://www.computermotion.com/.
[6] http://www.intuitivesurgical.com/.
[7] http://robotics.eecs.berkeley.edu/medical/.
[8] http://wwwserv2.iai.fzk.de/~artemis/welcome_engl.html.
[9] http://www.endoxirob.com/.
[10] http://www.laas.fr/robea/.
[11] E. Dombre, et al., Projet MARGE : modélisation, apprentissage et reproduction du geste endochirurgical, in : Proc. Journées ROBEA, Toulouse, Octobre 2002.
[12] A.J. Madhani, Design of teleoperated surgical instruments for minimally invasive surgery, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
[13] M. Michelin, E. Dombre, P. Poignet, F. Pierrot, L. Eckert, Achieving motion under a penetration point constraint, in : Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS 2002, Lausanne, Switzerland, September 30–October 4, 2002.
[14] http://www.lirmm.fr/~michelin/.