Conception optimale de systèmes robotiques redondants pour la chirurgie mini-invasive

Damien SALLÉ, Philippe BIDAUD

Laboratoire de Robotique de Paris (LRP)
BP61, 18 route du Panorama, 92265 Fontenay aux Roses
(salle,bidaud)@robot.jussieu.fr

Résumé :

Cet article présente un instrument robotisé à haute mobilité pour la chirurgie mini-invasive, dédié au pontage coronarien. Il est obtenu par l'utilisation d'une méthodologie de synthèse de mécanismes multi-critères, couplée à l'utilisation d'une simulation réaliste du geste chirurgical. Cet instrument est doté de 9 ddl dont 5 intra-cavitaires. La procédure d'optimisation, la conception mécanique et les performances cinématiques de l'instrument sont détaillées.

Abstract :

This paper introduces an original, dextrous, active and modular minimally invasive instrument dedicated to coronary artery bypass grafting surgery. Its design is obtained by a generic evolutionary optimization process using pareto-based multi objective genetic algorithms and including highly realist simulations and experimental models of the surgical gesture. The optimal instrument has 9 dofs (5 intra-cavital), is actuated by brushless micro motors and is position controlled. Its optimization, mechanical design and kinematic performances are discussed.

Mots-clefs :

Synthèse multi-critères, Conception optimale, Robotique Chirurgicale, Manipulateurs redondants, Singulatités

1 Introduction

Les techniques chirurgicales mini-invasives permettent de réduire considérablement les incisions réalisées sur le patient. En effet, il suffit de trois perforations de 10mm de diamètre pour insérer dans la cavité abdominale ou thoracique une caméra et deux instruments mini-invasifs. Les systèmes robotiques chirurgicaux existants, commerciaux [4,9] ou de recherche [1,6], souffrent d'un manque important de capacités de mouvement pour les opérations thoraciques [2,5]. Des instruments chirurgicaux à haute mobilité doivent donc être conçus et dédiés à ces procédures hautement complexes.

La recherche développée dans cet article propose d'augmenter le nombre de degrés de liberté de la partie distale des instruments. Cela permet une meilleure dextérité lors du geste chirurgical, une meilleure adaptation de l'instrument à l'environnement thoracique, en particulier pour accéder à des zones hors d'atteinte à l'heure actuelle, mais aussi une meilleure adaptabilité vis-à-vis de la position initiale des points d'insertion.

Les contraintes à prendre en compte lors de la conception d'un tel instrument proviennent de l'espace thoracique libre très limité, de la présence d'organes vitaux, de la complexité des gestes à réaliser mais également de la possibilité de redondance des instruments, de leur commande avec mouvements internes, de leur espace de travail ou encore de leur capacité de génération d'efforts. La cinématique d'un instrument à haute mobilité pour la chirurgie mini-invasive ne peut donc pas être choisie à la suite d'un simple processus intuitif. Une méthode d'exploration

et d'optimisation des cinématiques possibles est par conséquent proposée. Elle constitue un processus de synthèse de mécanismes redondants, multi-critères et orientée tâche.

La conception mécanique modulaire et innovante proposée est détaillée dans le chapitre 2. Le chapitre 3 illustre la méthodologie de conception optimale mise en place. Elle permet d'isoler un instrument dédié au pontage coronarien, baptisé DRIMIS (Dextrous Robotic Instrument for Minimally Invasive Surgery). Enfin la cinématique de ce dernier est détaillée et analysée en chapitre 4.

2 Conception mécanique modulaire

L'instrument à haute mobilité recherché doit posséder de nombreux degrés de liberté (ddl) intra-cavitaux pour accroître les capacités de mouvement du chirurgien. L'architecture mécanique proposée consiste en un manipulateur externe à 4 ddl qui oriente et insère un instrument mini-invasif dans le trocart ; cet instrument étant un mécanisme série de modules d'actionnement possédant 1 ou 2 articulations.

Deux types d'articulations rotoïdes ont été développées : orthogonale ou colinéaire à l'axe principal du module. Pour ces deux articulations, des micromoteurs entraînent une transmission par engrenages, comme illustré sur le module de gauche de la figure 1. Un aimant bipolaire, placé sur la partie mobile, crée un champs magnétique tournant qui est mesuré par un résolveur magnétique. En combinant ces articulations, des modules à 2 ddls peuvent être générés. Ils sont illustrés sur la partie droite de la figure 1. Au total, 9 modules d'actionnement et un module porte-aiguille ont été développés et peuvent être utilisés pour générer un instrument mini-invasif à haute mobilité. De plus amples détails sur cette conception mécanique sont disponibles dans le manuscrit de thèse de D.Sallé [8].

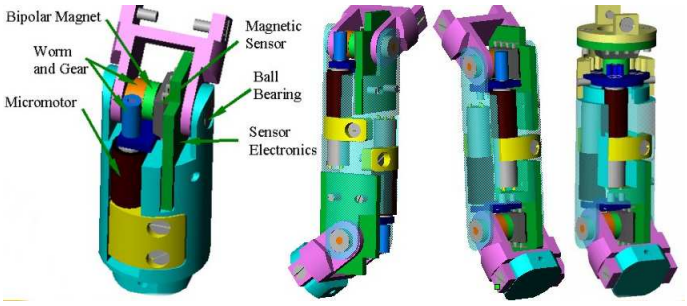

FIG. 1 – Conception mécanique modulaire

3 Conception optimale de l'instrument

La procédure de conception optimale doit générer et proposer des instruments non intuitifs, capables de reproduire le geste chirurgical en considérant les contraintes liées à l'environnement thoracique, à la conception mécanique et à la commande de l'instrument redondant. Elle est basée sur l'utilisation d'algorithmes génétiques multi-objectifs, couplés à une simulation réaliste de la tâche chirurgicale. Cette procédure permet d'évaluer et d'optimiser les instruments vis à vis de plusieurs critères de conception simultanément.

Les paramètres de l'algorithme génétique ont été redéfinis et adaptés au problème. Le génotype est définit comme un vecteur, de taille variable, de paires $< integer, float >$, correspondant au type et à la longueur de chaque module. Les opérateurs génétiques utilisés sont : croisement à un point, mutation homogène, mutation créative qui insère un module dans l'ins-

trument et mutation destructrice qui supprime un module.

3.1 Évaluation

Les instruments candidats doivent être évalués et notés quant à leur adaptation à la tâche robotique à réaliser. Cette évaluation est réalisée par une simulation réaliste de la procédure chirurgicale qui inclue des modèles 3D des organes thoraciques, une modélisation expérimentale du geste chirurgical et la commande cinématique redondante, nécessaire à l'optimisation des mouvements internes du manipulateur.

3.1.1 Commande de l'instrument redondant

Le système robotique à commander est composé d'un manipulateur externe à 4 ddl et de l'instrument mini-invasif à haute mobilité. La majorité des manipulateurs à évaluer sont donc redondants et leurs mouvements internes doivent être optimisés localement pour éviter les organes et maximiser la manipulabilité. Les vitesses et masses misent en jeu étant faibles, une commande cinématique redondante est implémentée, utilisant un modèle différentiel inverse :

$$dq = J^{\#}dX + (I - J^{\#}J)Z_0$$

où $(I - J^{\#}J)$ est un projecteur orthogonal et Z_0 est un vecteur arbitraire, homogène à dq.

Le mécanisme disposant de liaisons prismatiques et rotoïdes, l'homogénéité des calculs est assurée par l'utilisation d'une pseudo-inverse généralisée utilisant la matrice d'inertie du manipulateur [3] :

$$J^{\#} = M_q^{-1}J^t[JM_q^{-1}J^t]^{-1}$$

Deux critères sont utilisés pour optimiser les mouvements internes : la distance aux organes et l'indice de manipulabilité. La loi de commande peut donc être définie comme :

$$dq = J^{\#}dX + (I - J^{\#}J)\frac{\partial h}{\partial q}^T \text{ avec } \frac{\partial h}{\partial q} = \beta.\frac{\partial h_{organes}}{\partial q} + (1-\beta)\frac{\partial h_{manip}}{\partial q}$$

où $h_{organes}$ et h_{manip} sont des fonctions liées respectivement à la distance aux organes et à la manipulabilité, et β un terme permettant de hiérarchiser leur importance.

3.1.2 Calcul des scores d'évaluation

De nombreux critères de performance peuvent être définis. Parmi ceux-ci, 4 ont été sélectionnés lors de la mise en oeuvre de la méthode de conception optimale proposée :

- La performance en suivi de trajectoire. Elle traduit la capacité de l'instrument à réaliser le geste chirurgical et est calculée comme le nombre de points de la trajectoire pouvant être atteints avec une précision donnée.
- La manipulabilité au cours du mouvement. Elle traduit la dextérité et les capacités de mouvement du chirurgien. Une étude approfondie des différents critères de manipulabilité a été menée [8] et aboutit à l'utilisation du critère de Yoshikawa normalisé :

$$w_{normalise} = \sqrt{det(J_{normalise}J_{normalise}^t)} \text{ avec } J_{normalise} = N_v J N_q^{-1}.$$

$$\text{Et } N_v = diag(1,1,1,1/L_1,1/L_1,1/L_1)\text{ ; } N_q = diag(a_{11},a_{22},a_{33},...,a_{ii})$$

où $a_{ii} = 1$ pour les liaisons rotoïdes et $a_{ii} = 1/L_2$ pour les prismatiques ; L_1 et L_2 étant des longueurs caractéristiques.
Le critère de performance pour la manipulabilité au cours du geste chirurgical utilisé est alors la somme des indices de manipulabilité pour chaque point de la trajectoire.

– La distance séparant l'instrument des organes. Elle doit être perçue comme un indice de sécurité, et non comme un critère à maximiser absolument. Le calcul du critère de performance sur la distance aux organes est alors défini comme le minimum des distances instrument-organes atteintes à chaque point de la trajectoire.
– Les efforts généralisés ou forces et couples s'exerçant sur les articulations. Leur calcul est basé sur le modèle générique du geste chirurgical, déterminé expérimentalement et qui permet de connaître, pour chaque point de la trajectoire, l'effort $F = [\vec{0}; \vec{F}]$ qui doit être appliqué. Les couples articulaires nécessaires pour générer cet effort et pour compenser la gravité sont donc donnés par : $\tau = J^t F + \tau_{gravite}$
La valeur du critère de performance est prise égale au couple articulaire maximum atteint par chaque articulation et pour chaque point de la trajectoire.

3.2 Performances du processus d'optimisation

Une étude approfondie a été menée au cours de la thèse de D.sallé [8] sur les résultats obtenus par cette méthodologie de conception. De multiples optimisations ont montré que le processus est convergent, répétable et robuste vis à vis d'une modification de la tâche à réaliser.

4 Instrument optimal

A l'issue de cette étude, un instrument optimal a été isolé pour la procédure de pontage coronarien : il est optimal pour plusieurs positions de l'incision, il préserve une distance aux organes maximale dans toutes les configurations et dispose d'une manipulabilité accrue de 250% par rapport au système commercial da Vinci, comme illustré sur la figure 2 (instrument noté 188). Cet instrument a été dénommé DRIMIS : Dextrous Robotic Instrument for Minimally Invasive Surgery

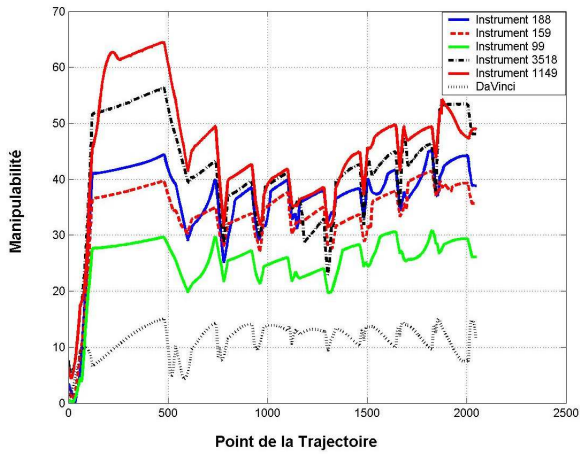

FIG. 2 – Évolution de la manipulabilité pour quelques instruments optimaux

4.1 Description cinématique de DRIMIS

Le système robotique de chirurgie mini-invasive proposé est doté de 9 ddl : 4 fournis par le manipulateur externe et 5 ddl intra-cavitaux. Le schéma cinématique de ce système est illustré en figure 3, de même qu'une vue CAO de la partie intra-cavitaire de l'instrument et que son évolution dans la simulation réaliste, lors de la réalisation d'un pontage coronarien. Un prototype à l'échelle 1 de cet instrument a été réalisé et ses performances sont jugées satisfaisantes pour une utilisation en chirurgie mini-invasive téléopérée.

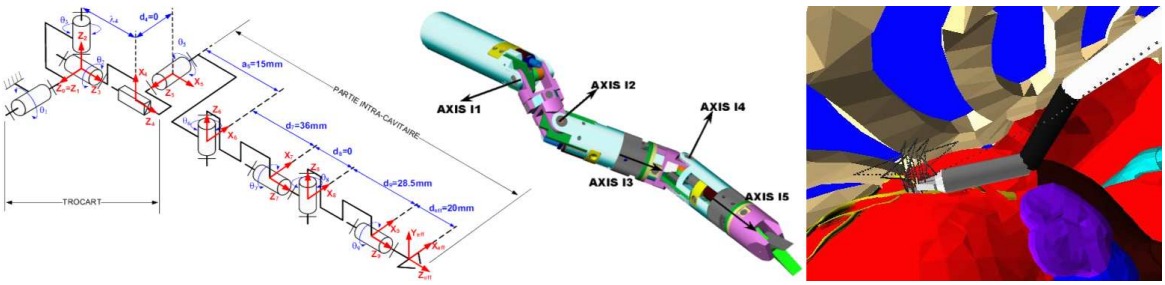

FIG. 3 – Instrument optimal : DRIMIS

4.2 Analyse des singularités

Une singularité correspond à une configuration articulaire pour laquelle la matrice jacobienne n'est pas de rang plein. Ces configurations doivent être identifiées et évitées lors de l'utilisation du mécanisme. Nokleby et Podhorodeski [7] proposent une méthode élégante pour les identifier dans le cas de mécanismes redondants. Leur méthodologie est basée sur la réciprocité des torseurs cinématiques et des torseurs d'efforts. Dans une configuration singulière, la perte d'un degré de mobilité se traduit par l'impossibilité de générer une vitesse suivant une direction de l'espace, quels que soient les efforts appliqués dans ce but. Dans une telle configuration, il existe donc un torseur qui est réciproque au système des torseurs cinématiques du manipulateur. Identifier les configurations pour lesquelles un tel torseur existe permet non seulement de déterminer l'existence de positions singulières mais aussi la direction de l'espace selon laquelle aucun mouvement n'est réalisable.

Appliquée à l'instrument DRIMIS, cette étude montre que le manipulateur possède 4 conditions suffisantes pour que les configurations articulaires engendrent une dégénérescence d'ordre 1 du rang de la jacobienne, donc constituent une configuration singulière :

1. $\theta_5 = \frac{\Pi}{2}$ et $\theta_6 = (0 \text{ ou } \Pi)$ et $\lambda_4 = a5$ et $\theta_2 = 0$
2. $\theta_5 = \frac{\Pi}{2}$ et $\theta_6 = (0 \text{ ou } \Pi)$ et $\lambda_4 = a5$ et $\theta_3 = \pm\frac{\Pi}{2}$
3. $\theta_5 = (0 \text{ ou } \Pi)$ et $\theta_6 = \frac{\Pi}{2}$ et $\lambda_4 = 0$
4. $\theta_5 = (0 \text{ ou } \Pi)$ et $\theta_6 = \frac{\Pi}{2}$ et $\theta_2 = 0$ et $\theta_3 = \pm\frac{\Pi}{2}$

Quelques-unes de ces configurations sont illustrées en figure 4. Il suffit de restreindre les bornes articulaires des axes 5 et 6 à $]0, \Pi[$ pour garantir l'inexistence de configurations singulières dans l'espace de travail du manipulateur.

5 Conclusion

Un instrument robotisé à haute mobilité, original et dédié à la chirurgie mini-invasive a été proposé. Sa cinématique est issue d'un processus de synthèse de mécanismes redondants,

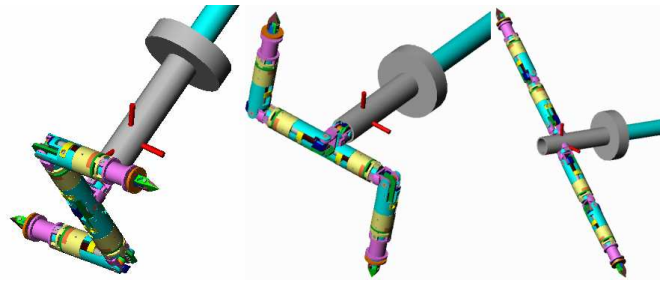

FIG. 4 – Quelques configurations singulières

multi-critères et qui a prouvé être convergent, répétable, robuste et cohérente. Il repose sur une optimisation par algorithmes génétiques multi-objectifs, couplée à une simulation réaliste du geste chirurgical. Les instruments sont évalués d'après 4 critères : capacité à reproduire le geste chirurgical, manipulabilité, distance aux organes et couples articulaires.

Un instrument, considéré comme optimal, a été isolé et baptisé DRIMIS : Dextrous Robotic Instrument for Minimally Invasive Surgery. L'analyse de sa cinématique montre l'inexistence de configurations singulières sur son espace de travail. Un prototype de cet instrument a été réalisé à l'échelle 1. Ses performances sont compatibles avec une utilisation en chirurgie mini-invasive télé-opérée.

Références

[1] M. C. Cavusoglu, F. Tendick, M. Cohn, and S. Sastry. Robotics for telesurgery : Second generation berkeley/ucsf laparoscopic telesurgical workstation and looking towards the future applications. In *Proceedings of the 39th Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, volume 15-4, 2001.

[2] R. J. Damiano, H. A. Tabaie, M. J. Mack, J. R. Edgerton, C. Mullangi, W. P. Graper, and S. M. Prasad. Initial prospective multicenter clinical trial of robotically-assisted coronary artery bypass graphting. *Annals of Thoracic Surgery*, 72 :1263–1269, 2001.

[3] K. Doty, C. Melchiorri, and C. Bonivento. A theory of generalized inverses applied to robotics. *International Journal of Robotic research*, 12(1) :1–19, February 1993.

[4] G. Guthart and J. Salisbury. The intuitive telesurgery system : Overview and application. In *Proc IEEE Inernational Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 618–621, 2000.

[5] R. Howe and Y. Matsuoka. Robotics for surgery. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 01 :211–240, 1999.

[6] A. J. MADHANI. *Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.

[7] S. Nokleby and R. Podhorodeski. Reciprocity-based resolution of velocity degeneracies (singularities) for redundant manipulators. *Journal of Mechanism and Machine Theory*, Vol 36 :pp 397–409, 2001.

[8] D. SALLE. *Conception optimale d'instruments robotisés à haute mobilité pour la chirurgie mini-invasive*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2004.

[9] www.computermotion.com.