

## Génération de trajectoires de manipulation d'objets à l'aide d'un exosquelette isomorphe à la main mécanique à 16 ddl du LMS

M. Arsicault, J.P. Gazeau, S. Zegloul

Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS), UMR CNRS 6610, Université de Poitiers, SP2MI, 2 Bd Pierre et Marie Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, (France).

{arsicault, gazeau, zegloul}@lms.univ-poitiers.fr

### Résumé :

*Ce papier concerne le développement et la mise en oeuvre d'un exosquelette particulier que nous avons développé pour la main mécanique à 16 ddl du LMS. Celui-ci possède une architecture cinématique et des dimensions identiques à cette main mécanique. Cette particularité permet d'obtenir très rapidement et très facilement des trajectoires de manipulation pour leur exécution par la main mécanique. Nous présentons cet exosquelette, l'interface graphique et la méthode développée pour déterminer les coordonnées opérationnelles de l'objet pendant cette phase d'apprentissage afin de synchroniser graphiquement le mouvement de l'objet avec celui des doigts tout en s'affranchissant de capteurs extéroceptifs. Enfin nous donnons un exemple de trajectoire de référence obtenue à partir de l'exosquelette et reproduite avec succès graphiquement et par la main mécanique.*

### Abstract :

*This paper relates to the design and the implementation of a specific exoskeleton for the 16-DOF LMS mechanical hand. Its kinematics architecture and dimensions are identical to this mechanical hand. This feature allows us to obtain manipulation trajectories for the LMS mechanical hand, very easily and very quickly, by using the exoskeleton. The characteristics of this exoskeleton and the graphic interface are presented. This one uses a method to determine the object's evolution during the manipulation with the exoskeleton, without using exteroceptive sensors. The approach was tested successfully for standard trajectories by simulation on a CAD robotics system and by using the mechanical hand.*

**Mots-clefs : Exosquelette ; Manipulation ; Planification.**

### 1 Introduction

L'étude présentée ici permet de produire rapidement et simplement des trajectoires de manipulation pour la main mécanique du LMS - Gazeau et Al. (2002, 2005, 2007) - en utilisant une technique innovante d'apprentissage à l'aide d'un exosquelette particulier que nous avons développé. La littérature traite de diverses formes d'apprentissage et de dispositifs permettant une définition plus ou moins complète des mouvements des doigts humain lors de manipulations d'objets. En fonction des applications, des exosquelettes ou des gants de données sont généralement utilisés pour récupérer l'ensemble des postures de la main humaine pendant l'exécution d'une tâche de manipulation. Par exemple, les travaux réalisés par Fischer et Al (1998), Griffin et Al. (2000) ou bien Hu et Al (2004) montrent que pour extraire la position des doigts d'un opérateur, les gants de données et les exosquelettes nécessitent tous une phase de calibrage et une modélisation fine de la main humaine pour connaître avec précision ses paramètres articulaires. De plus, dans le cadre des recherches s'appliquant aux mains mécaniques, une étape supplémentaire est nécessaire pour traduire les paramètres articulaires de la main de l'opérateur en paramètres articulaires de la main mécanique. Ce passage dégrade fortement les potentialités du système esclave et induit une multitude de source d'erreurs et d'approximations liées au facteur d'échelle et aux cinématiques différentes dont nous nous

affranchissons dans la nouvelle approche que nous abordons ici. Celle-ci se propose d'utiliser l'habileté d'un opérateur pour exploiter au mieux la dextérité potentielle de la main mécanique du LMS. Pour cela, nous utilisons un exosquelette spécifique présenté en section 2. La section 3 présente le modèle utilisé pour simuler graphiquement le déplacement de l'objet en cours de manipulation par l'exosquelette, sans avoir recours à des capteurs extéroceptifs. La section 4 donne quelques exemples de trajectoires de références exécutées par l'exosquelette et la main mécanique qui permettent de conclure sur l'intérêt d'une telle approche.

## 2 Présentation de l'exosquelette

L'exosquelette que nous avons réalisé (figure 1c) reprend entièrement la cinématique de la main mécanique (figure 1a et 1b) avec un rapport homothétique égal à 1. Les notations précisées sur la figure 1a seront celles utilisées dans la suite de l'article. Cet exosquelette est constitué de quatre chaînes cinématiques séries à 4 mobilités matérialisant les trois doigts (longs) et le pouce en opposition. Les amplitudes des mouvements de flexion-extension et d'abduction-adduction sont identiques à celles de la main mécanique et les longueurs des phalanges sont également respectées. Comme montré sur la figure 1c, les phalanges distales des doigts de la main de l'opérateur viennent se loger dans des goussets de dimensions et de forme extérieure hémisphérique identiques aux phalanges distales de la main mécanique. Les propriétés de contact avec l'exosquelette sont similaires aux propriétés rencontrées avec la main mécanique. Le poignet de l'opérateur est sanglé, le reste de la main est libre. Dans la configuration actuelle, l'exosquelette développé est passif et permet uniquement, lors des manipulations, l'acquisition des paramètres articulaires de position relevés par 16 potentiomètres déportés des articulations pour ne pas gêner les mouvements des doigts. La fréquence d'acquisition des paramètres articulaires est de 50 Hz. Une carte d'interface entre le PC d'acquisition et l'exosquelette permet un réglage gain-offset pour l'adaptation des signaux issue des capteurs. Les informations de positions sont stockées dans une base de données pour être analysées d'une part et exploitées graphiquement par un module spécifique que nous avons développé sous le logiciel de CAO robotique SMAR du LMS (Système de Modélisation et d'Animation de Robots - Zeghloul et Al.(1997)).

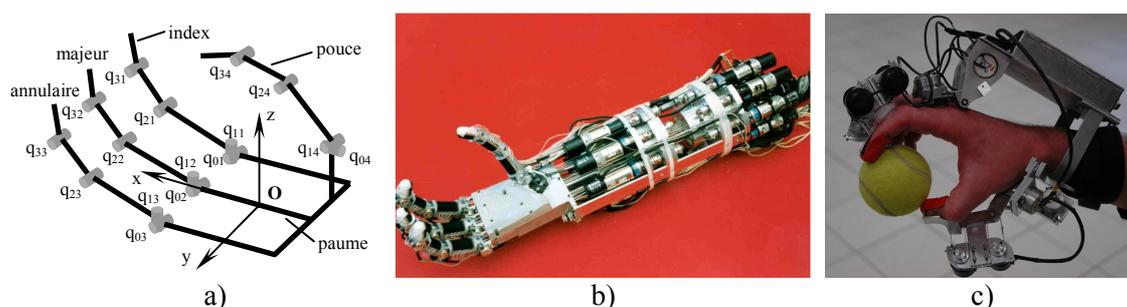


Fig. – 1 : Cinématique de l'exosquelette et de la main du LMS a) et exosquelette du LMS b).

## 3 Exploitation des données pour la simulation

Pour cette application et inversement à une planification directe par l'outil CAO où la trajectoire de l'objet est connue, nous disposons ici uniquement des paramètres articulaires enregistrés par l'exosquelette pour identifier cette tâche. Il s'agit donc de déterminer l'évolution des points de contacts pendant la manipulation à partir d'une configuration de prise initiale connue pour un objet dont la géométrie et les dimensions sont également connues. En effet, le mouvement de l'objet résultant du mouvement des doigts doit être connu pour procéder à son analyse d'une part et son animation graphique en CAO d'autre part. Afin d'éviter l'utilisation de

capteurs extéroceptifs, le mouvement de l'objet est déterminé en adaptant le modèle développé par Kerr et Roth (1986). Ils formulent le problème de manière inverse, c.à.d. en déterminant le mouvement de chaque doigt pour obtenir le mouvement désiré de l'objet. Chaque doigt est considéré comme un manipulateur indépendant qui doit suivre le mouvement de l'objet. La forme du bout de doigt et la forme de l'objet sont supposées quelconques. La contrainte au niveau du contact est de type contact ponctuel avec frottement. Avec l'hypothèse de roulement sans glissement entre la surface de l'objet et celle du doigt, la trajectoire du point de contact sur chacune de ces surfaces peut être déterminée en fonction de la géométrie de chaque surface, du mouvement de l'objet, et de la cinématique du doigt. De part la contrainte non holonome de roulement, les équations exprimant le mouvement de l'objet par rapport au bout de doigt sont données en terme de vitesses. On a ainsi en suivant les notations de la figure 2, le système d'équations suivant :

$${}^P O O_T(q_0, q_1, \dots, q_n) + {}^T C(\alpha, \beta) = {}^P O O_B(x, y, z) + {}^B C(\eta, \zeta) \quad (1)$$

$${}^T n(\alpha, \beta) = {}^B n(\eta, \zeta) \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_T(q_0, q_1, \dots, q_n) + \boldsymbol{\omega}_T \wedge {}^T C = \mathbf{V}_B(x, y, z) + \boldsymbol{\Omega}_B \wedge {}^B C \quad (3)$$

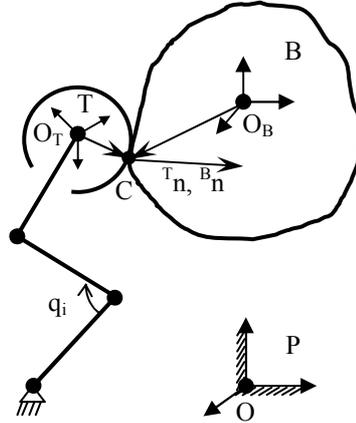


Fig. – 2 : Un doigt contraint à rouler sur l'objet

La relation 1 représente les équations exprimant les coordonnées du point de contact C dans le repère P en passant par le doigt ou par l'objet. La relation 2 traduit l'égalité des normales  ${}^T n$  et  ${}^B n$  au point de contact C. La relation 3 représente les équations qui exprime, pour une condition de roulement sans glissement, l'égalité des vitesses au point de contact C vu du côté doigt et vu du côté objet. Pour notre application, nous considérons que seulement trois doigts sont impliqués dans la prise. Le quatrième doigt est utilisé uniquement pour repositionner l'objet dans la main. Le système précédent a 27 équations ne fait apparaître que 18 inconnues qui sont les 6 coordonnées opérationnelles de l'objet et pour chaque doigt, les variables  $\alpha, \beta$  paramétrant la surface du bout de doigt et les variables  $\eta, \zeta$  paramétrant la surface de l'objet.

Pour chaque doigt en contact avec l'objet, on obtient finalement sous forme matricielle, le système suivant de 9 équations :

$${}^P O_T + {}^P A_T \cdot {}^T C = {}^P O_B + {}^P A_B \cdot {}^B C \quad (1')$$

$${}^P A_T \cdot {}^T n = {}^P A_B \cdot {}^B n \quad (2')$$

$$\delta O_T + \left( {}^P J_{\omega}(\mathbf{q}^{i-1}) \cdot \delta \mathbf{q}^i \right) \wedge \left( {}^P A_T^{i-1} \cdot {}^T C^{i-1} \right) = \delta O_B + \left( {}^P A_B^{i-1} \cdot \delta \theta \right) \wedge \left( {}^P A_B^{i-1} \cdot {}^B C^{i-1} \right) \quad (3')$$

Pour un bout de doigt de forme hémisphérique, la relation 2' est réduite à 2 équations uniquement pour traduire l'égalité des normales. Il est donc nécessaire d'introduire 6 nouvelles inconnues pour se ramener à un système non linéaire de 24 équations à 24 inconnues. Une solution intuitive est de passer 6 paramètres articulaires parmi les 12 en inconnues, ce qui nous offre une multitude de choix qui sont discutés en section 4. Ce système non linéaire est résolu par la méthode de Newton-Raphson et les angles définissant l'orientation de l'objet B dans le repère P sont déterminés pour chaque incrément de mouvement. Pour chaque incrément de mouvement, l'objet s'est orienté de  $\delta\theta$  par rapport à B. Comme  $\delta\theta$  est petit, la matrice de passage correspondante peut donc s'écrire :

$$A_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\theta_z & \delta\theta_y \\ \delta\theta_z & 1 & -\delta\theta_x \\ -\delta\theta_y & \delta\theta_x & 1 \end{bmatrix}.$$

Par conséquent :

$${}^P A_B = {}^P A_B^{i-1} \cdot A_{\theta} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

avec  ${}^P A_B^{i-1}$  la matrice de passage à l'itération i-1.

Par identification avec la matrice de passage  ${}^P A_B$ , les angles de cardan définissant l'orientation de l'objet sont donnés par :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \text{ATAN2} \left( \left( \frac{-A_{23}}{\cos \varphi_2} \right), \left( \frac{A_{33}}{\cos \varphi_2} \right) \right) \\ \varphi_2 &= \text{ASIN}(A_{13}) \\ \varphi_3 &= \text{ATAN2} \left( \left( \frac{-A_{12}}{\cos \varphi_2} \right), \left( \frac{A_{11}}{\cos \varphi_2} \right) \right) \end{aligned}$$

Pour obtenir la trajectoire de l'objet, la méthode itérative présentée nécessite la connaissance de la configuration initiale de l'objet, c'est-à-dire sa prise initiale.

#### 4 Résultats expérimentaux

Nous avons vu en section 3 que 6 nouvelles inconnues devaient être choisies parmi les 12 paramètres articulaires pour se ramener à un système non linéaire de 24 équations à 24 inconnues. Il existe  $C_{12}^6 = 920$  possibilités pour choisir ces inconnues. Intuitivement, on conçoit aisément qu'il est préférable de prendre comme inconnues, les valeurs des paramètres articulaires des mouvements d'abduction-adduction pour ne pas verrouiller l'espace des configurations de chaque doigt à un seul plan. Cette supposition a toutefois été vérifiée et tous les choix examinés pour des mouvements de rotation et de translation d'objets parallélépipédiques ou cylindriques. Pour valider notre algorithme, nous utilisons un dispositif expérimental qui permet de verrouiller 5 ddl de l'objet. Ainsi, l'objet ne peut décrire qu'une rotation ou qu'une translation pure autour d'un axe principal et les trajectoires calculées peuvent facilement être comparées aux trajectoires réelles. Nous avons constaté que tous les essais qui prennent les mouvements d'abduction-adduction ( $q_{04}$  pour le pouce,  $q_{11}$  et  $q_{12}$  pour les doigts longs) comme inconnues du problème donnent des résultats similaires à la figure 3a. Celle-ci montre les résultats obtenus lorsque les données en provenance de l'exosquelette sont

conservées pour l'ensemble des mouvements de flexion-extension des phalanges intermédiaires  $q_{2i}$  et distales  $q_{3i}$  ( $i=1,2,4$ ). Les paramètres  $q_{0i}$  et  $q_{1i}$  calculés sont comparés à ceux mesurés par l'exosquelette lors de la rotation d'un cylindre. Pour plus de clarté, les paramètres  $q_{0i}$  et  $q_{1i}$  calculés ne sont représentés sur la figure 3a que toutes les 200 ms. Les écarts obtenus montrés figure 3b ne dépassent pas  $1.2^\circ$ , ce qui est suffisant pour notre application. Précisons que lors de la manipulation avec l'exosquelette, le glissement de l'objet dans les doigts peut se produire. Le modèle mis en place a donc tendance à, soit corriger la trajectoire de l'objet, soit modifier les paramètres articulaires pris comme inconnues pour éliminer les glissements éventuels et toutes comparaisons entre trajectoires réelles et trajectoires calculées ne pourront se faire que si l'objet n'a pas glissé.

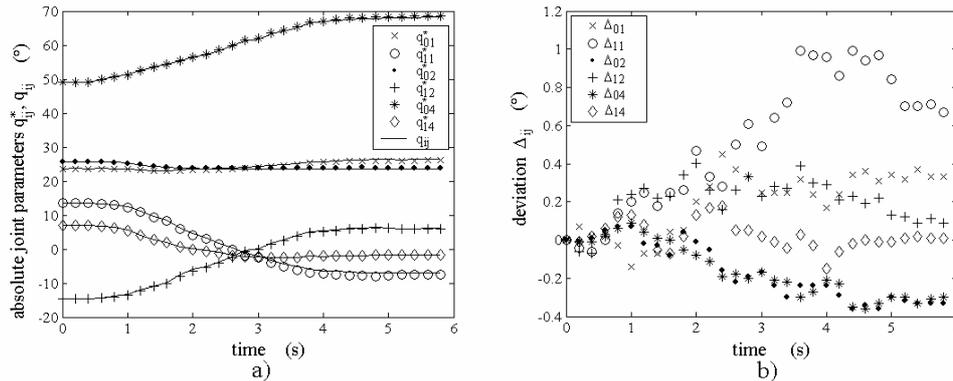


Fig. – 3 : Paramètres calculés ( $q_{ij}^*$ ) et paramètres mesurés ( $q_{ij}$ ) pour  $q_0$  et  $q_1$  pris comme inconnus pour une rotation d'un cylindre autour de  $z$  (a), écarts  $\Delta_{ij} = q_{ij} - q_{ij}^*$  (b).

Pour cette trajectoire (rotation de l'objet cylindrique), la figure 4a montre les coordonnées opérationnelles définissant le mouvement de l'objet. La figure 4b montre la trace des doigts dans le plan  $x-y$  calculées pour cette trajectoire. Pour cet exemple, l'objet cylindrique a décrit une rotation  $\psi_3$  d'environ  $63^\circ$  sans qu'il soit nécessaire de repositionner les doigts. Le rayon de la partie hémisphérique de chaque doigt est pris égal à 9mm. Le diamètre calculé du cylindre est de 51,6 alors qu'il est en réalité de 51,2. Ce faible écart est très satisfaisant d'autant plus qu'il reste inférieur à quelques dixièmes de mm pour les objets de taille et de forme différentes que nous avons testés. La figure 4a et 4b montre que les calculs donnent des résultats proches de la trajectoire réelle de l'objet avec un mouvement parasite de celui-ci acceptable. Nous avons ensuite reproduit cette rotation en libérant complètement l'objet. Dans ce cas l'opérateur choisit la prise initiale en vue de faire tourner l'objet avec une amplitude la plus grande possible sans avoir à repositionner les doigts. Les écarts entre les paramètres calculés et les paramètres mesurés pour  $q_0$  et  $q_1$  sont du même ordre de grandeur que précédemment. L'objet cylindrique a décrit cette fois-ci une rotation  $\psi_3$  d'environ  $80^\circ$  mais subit également une translation d'ensemble non souhaité a priori suivant  $y$  d'environ 13mm, les autres paramètres étant moindres. Nous avons également procédé à des essais pour des mouvements de translations d'objets et des mouvements combinés de rotation/translation. Les résultats donnent encore des écarts très satisfaisants entre les paramètres calculés et les paramètres mesurés qui sont du même ordre de grandeur que ceux que nous venons de présenter. Ceci prouve l'efficacité du modèle développé. Par contre nous avons également montré qu'il existe des écarts importants lorsque les mouvements d'abduction-adduction sont pris comme données du problème. Dans ce cas, ils existent également des combinaisons où les calculs ne convergent pas. Ce constat conforte donc le choix de prendre comme inconnues les mouvements d'abduction-adduction.

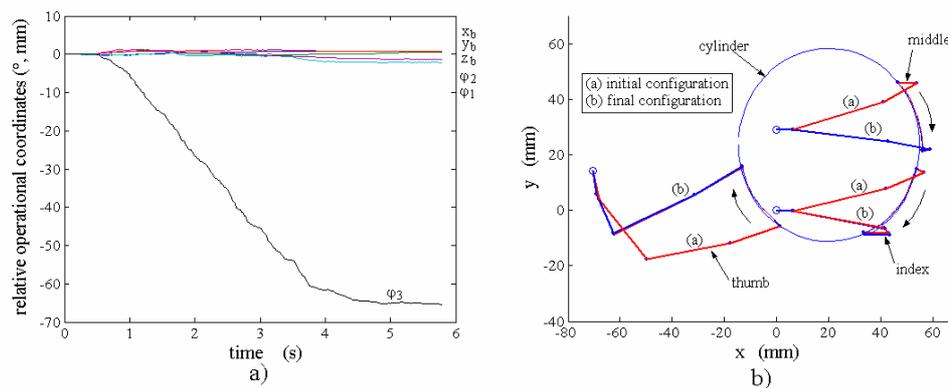


Fig – 4 : Coordonnées opérationnelles de l'objet (a) et trace des doigts (b) dans le plan x-y obtenus pour une rotation imposée autour de z.

## 5 Conclusion et perspectives

Nous venons de présenter un exosquelette de cinématique identique à la main mécanique du LMS et de rapport homothétique égal à 1. La mise en œuvre de l'exosquelette et de son module d'exploitation permet l'enregistrement des paramètres articulaires des doigts. Ces données et la connaissance de l'objet permettent le calcul des coordonnées opérationnelles de l'objet afin de simuler et synchroniser graphiquement sa trajectoire avec celle des doigts sans avoir recours à l'utilisation de capteurs extéroceptifs. Les résultats obtenus ainsi sont très satisfaisants pour des trajectoires de références. Les perspectives sont d'utiliser cet exosquelette pour planifier des trajectoires plus complexes nécessitant l'utilisation du quatrième doigt pour repositionner l'objet et de les faire exécuter le plus fidèlement possible par la main mécanique.

## Références

- Fischer M., Van Der Smagt P., Hirzinger G. 1998 "Learning Techniques in a Dataglove Based Telemanipulation System for the DLR Hand", IEEE ICRA, pp1603-1608.
- Gazeau J.P., Zeghloul S., Arsicault M., Lallemand J.P. 2002 « Manipulation with the LMS mechanical hand: a strategy for fingertip manipulation tasks », AII-JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, **vol. 36**, « Recent Trends In Mechatronics, pp. 1205-1219, n°9.
- Gazeau J.P., Zeghloul S., Ramirez G. 2005 « Manipulation with a polyarticulated mechanical hand : a new efficient real-time method for computing fingertip forces for a global manipulation strategy », Robotica, **vol. 23**, pp. 479-490.
- Gazeau J.P., Zeghloul S., Fernandez A., Arsicault M. 2007 « Object Manipulation Task with a dextrous mechanical hand including regrasp », WSEAS Transactions on Systems, ISSN 1109-2777, p815-822, Issue 4, **vol. 6**.
- Griffin W.B., Findley R.P., Turner M.L., and M.R. Cutkosky 2000 "Calibration and mapping of a human hand for dexterous telemanipulation", Proceeding of ASME IMECE, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, Vol. 69(2).
- Hu H., Gao X., LI J., Wang J., Liu H. 2004 "Calibrating Human Hand for Teleoperating the HIT/DLR Hand", Proceeding of the 2004 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, pp. 4571-4576.
- Kerr J., Roth B. 1986 "Analysis of Multifingered Hands" The International Journal of Robotics Research, **vol. 4**, N° 4, pp 3-17.
- Zeghloul S., Blanchard B., Ayrault M. 1997 « SMAR : A Robot Modeling and Simulation System », Robotica, **vol. 15**, Part 1, pp. 63-73.