

Manipulation dextre par des mains mécaniques avec prise en compte de la dynamique

J.A. ROJAS QUINTERO, J.P. GAZEAU, P. SEGUIN, M. ARSICAULT

*Institut PPRIME (Pôle Poitevin de Recherche pour l'Ingénieur en Mécanique, Matériaux et Energétique),
SP2MI Téléport 2, Boulevard Marie et Pierre Curie, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex*

Résumé :

La manipulation fine d'objets est une tâche essentielle pour une main mécanique anthropomorphe afin de l'inscrire dans un contexte de robotique humanoïde ou encore d'assistance en milieu humain. Les recherches en préhension concernent souvent la prise stable d'objets. La méthode présentée ici concerne la manipulation dextre en tenant compte des aspects dynamiques du mouvement. Le papier présente une stratégie basée sur une approche géométrique ; elle concerne le déplacement et le changement d'orientation de l'objet initialement saisi par une main mécanique et imposées par les doigts de cette dernière. Le contact ainsi que les interactions entre l'objet et les doigts sont modélisés. La cinématique et la dynamique de l'objet sont prises en compte ; celles du préhenseur ainsi que ses limites le sont également.

Abstract :

Dexterous manipulation is an essential task for an anthropomorphic robotic hand so that it can be considered in a humanoid or a human assistance robotics context. The research, in terms of prehensile manipulation frequently concern stable grasping of an object. The method shown here constitutes a solution in terms of dexterous manipulation, taking the movement dynamics into account. We present a strategy based on a geometrical approach, which concerns the linear and angular transformation of the object position initially grasped by a mechanic hand, and imposed by the latter. Object kinematics and dynamics are regarded; these aspects accompanied, with the mechanical limits of the hand are also considered.

Mots clefs : tâche de manipulation, manipulation dextre, préhension, dynamique, main mécanique

1 Introduction

Les robots se substituent depuis bien longtemps et de manière plus ou moins efficace à l'homme en milieu industriel pour des tâches pénibles ou dangereuses. Beaucoup d'efforts ont été fournis pour concevoir des systèmes mécaniques capables d'imiter l'homme et ses capacités de manipulation.

La dynamique de la préhension trouve bien souvent son application dans la réception et la saisie d'objets initialement mis en mouvement (que ce soit au vol ou sur un support). Ces travaux ont commencé à être explorés dans les années 90. Au départ il s'agissait de définir la coordination entre une main mécanique et un système de vision (Hong [1]). D'autres travaux ont intégré des caractères biomimétiques tels que l'apprentissage par l'humain (Kang [2]). Lynch [3] a démontré par la suite que la manipulation dynamique pouvait passer par un dispositif à un seul degré de liberté ; cette étude permettait le roulement sans glissement et la mise en mouvement d'objets. Une autre étude par Higashimori [4] consiste à attraper un objet initialement mis en mouvement sur une table. Cette étude est basée sur le moment où il faut saisir l'objet à partir des informations obtenues par un système de vision. La vitesse de l'objet ainsi que sa vitesse de rotation sont déduites à l'aide de ce dispositif dans un plan 2D. On peut ensuite citer l'étude plus poussée de Furukawa [5] qui consiste à attraper un objet au vol à l'aide d'une main. Ces travaux ne portent cependant pas sur la manipulation dextre d'objets dans l'espace.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre afin de compléter les travaux de recherche effectués au sein de l'axe RoBioSS de l'Institut PPRIME. Nous avons au sein de l'équipe conçu une main mécanique anthropomorphe en vue de la réalisation de tâches de manipulation dextre en bout de doigt (Gazeau [6]) ; ensuite une stratégie globale qui considère l'ensemble des aspects relatifs à ce type de tâche a été développée. Ces aspects concernent ainsi le repositionnement des doigts lors de tâches de préhension/manipulation (Gazeau [7]) ; la

planification de tâches de manipulation par apprentissage (à l'aide d'un exosquelette) avec une approche biomimétique (Chaigneau [8]); la synthèse de prise initiale ainsi que la stabilité de prise d'objets avec une approche quasi-statique (Daoud [9]). Ainsi la finalité de ces travaux est de doter à terme les mains robotiques de capacités manipulatoires comparables à celles de l'homme.

La stratégie proposée dans cet article consiste à associer à un objet initialement saisi en bout de doigts, un mouvement dans l'espace. On souhaite également contrôler l'accélération de l'objet.

Dans un premier temps, nous présenterons la stratégie en matière de planification de mouvements en vue de la réalisation de tâches de manipulation fine d'objets. Ensuite l'interaction entre l'objet et les doigts de la main sera modélisée, nous décrirons ainsi les actions que ces derniers doivent exercer sur l'objet afin d'imposer une dynamique à l'objet, et la manière de déterminer ces actions mécaniques. Nous poursuivrons par la présentation de résultats de simulation et nous proposerons des perspectives à notre travail.

2 Stratégie du mouvement

Dans notre analyse en matière de manipulation d'objets, deux aspects principaux interviennent :

- l'aspect géométrique, défini par le positionnement et l'interaction entre l'objet et les doigts d'une main mécanique ;
- l'aspect dynamique, défini par l'accélération que l'on souhaite imposer à l'objet et les actions exercées par les bouts des doigts de la main mécanique.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- le contact entre les doigts et la surface de l'objet est ponctuel ;
- les bouts de doigts hémisphériques roulent sans glisser sur la surface de l'objet ;
- les objets manipulés sont indéformables ;
- les manipulations sont exercées seulement par les bouts de doigts ;
- les doigts sont au nombre de 3 ;
- la géométrie de l'objet et ses propriétés physiques sont supposées connues à l'avance ;

Une tâche de manipulation est définie par le déplacement linéaire de l'objet et le changement de son orientation, imposés par les doigts de la main mécanique.

Les positions et orientations de l'objet sont données par le vecteur trajectoire $\mathbf{P}(t) \in \mathbb{R}^6$:

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}(t) \\ \Phi(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

où :

- $\mathbf{G}(t) \in \mathbb{R}^3$ est la position du centre de gravité de l'objet au cours du mouvement;
- $\Phi(t) \in \mathbb{R}^3$ est l'orientation de l'objet dont les composantes sont les angles de cardan.

La trajectoire de l'objet $\mathbf{P}(t)$ aura un profil polynomial de degré 7 afin de contrôler l'accélération de l'objet. Ce type de profil a été choisi afin de pouvoir réaliser un raccordement en accélération entre les trajectoires successives.

Il reste alors à déterminer le mouvement que chaque doigt devra exercer indépendamment afin d'assurer le maintien de l'objet durant la tâche de manipulation. Il s'agit alors de déterminer pour chaque doigt la position du point de contact entre l'extrémité du doigt et la surface de l'objet, tout en respectant le roulement sans glissement. Un travail de synthèse de prise s'effectue avant de commencer le mouvement. La position du point de contact est alors connue à cet instant (Daoud [9]).

Cette position est ensuite donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{GP}_{c_i}(t_i) = \begin{bmatrix} R_x(\phi_1)R_y(\phi_2)R_z(\phi_3) & \mathbf{L} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{GP}_{c_i}(t_0) \quad (2)$$

où :

- $\mathbf{GP}_{c_i} \in \mathbb{R}^4$ est le vecteur allant du centre de gravité de l'objet (\mathbf{G}) au point de contact du doigt (\mathbf{P}_{c_i}), pour $i = 1,2,3$;
- $R_x(\phi_1)R_y(\phi_2)R_z(\phi_3)$ est une matrice 3×3 associée au changement d'orientation de l'objet par les angles de cardan ;
- $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^3$ est le déplacement linéaire exercé par le point de contact sous l'effet du mouvement imposé.

Une fois que la position du point de contact lors de la tâche de manipulation a été obtenue, la résolution du modèle géométrique inverse conduit à l'obtention des paramètres articulaires du doigt, qui permettront de placer le centre E du bout de doigt hémisphérique (cf. figure 1), pour assurer la trajectoire.

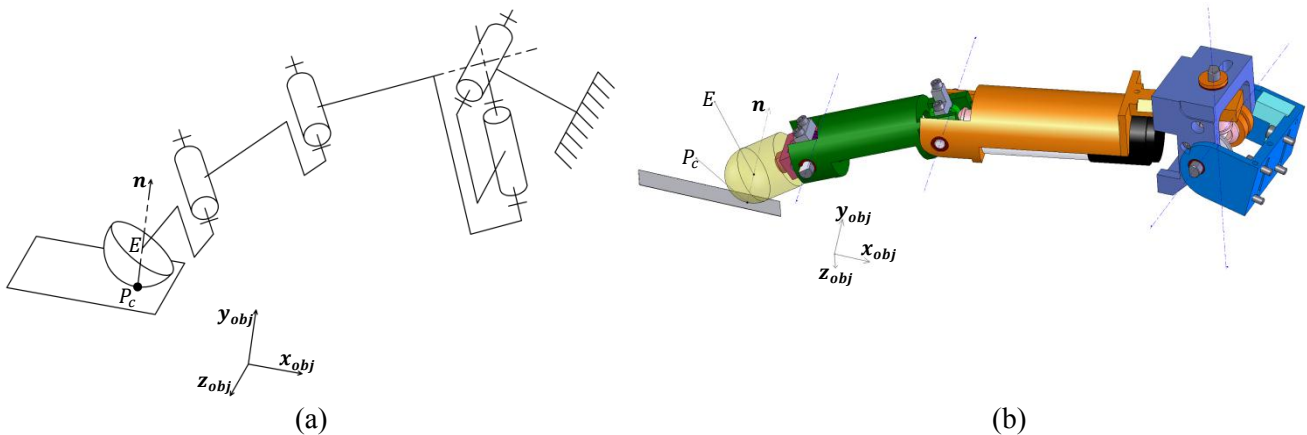


FIG. 1 – Contact entre un bout de doigt et une facette de la surface de l'objet. Schéma cinématique (a) et modèle CAO d'un doigt en contact avec un plan (b)

La distance entre la surface de l'objet et le centre de la demi-sphère est toujours égale au rayon R de cette dernière, et se trouve suivant le vecteur normal à la surface de l'objet \mathbf{n} .

$$\mathbf{P}_c \mathbf{E} = R \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

3 Dynamique du mouvement

Dans la partie précédente, nous avons exprimé les aspects géométriques de notre approche. Ces aspects doivent être complétés de la synthèse de la stabilité dynamique de l'objet en mouvement. Aux points de contact, les doigts exercent des forces sur l'objet qui assurent la trajectoire de ce dernier, en évitant le glissement et la rupture de contact. Il s'agit ici d'exprimer ces efforts.

En plus des hypothèses exprimées au paragraphe précédent, nous considérons également :

- les lois de Coulomb pour le frottement au point de contact ;
- les paramètres inertiels et la masse de l'objet ;
- la stabilité dynamique est vérifiée à chaque instant.

La méthode s'inspire de celle développée par Park [10]. Il s'agit de déterminer les efforts au bout des trois doigts qui assurent la trajectoire.

Il existe une relation entre le torseur des actions extérieures exercées sur l'objet \mathbf{f} , et les efforts aux points de contact \mathbf{F} :

$$\mathbf{f} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{F} \quad (4)$$

Ce torseur est connu dans notre approche et s'obtient par :

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} m_{obj} \cdot \frac{d^2(\mathbf{G}(t))}{dt^2} \\ \mathbf{I}_{obj} \cdot \frac{d^2(\Phi(t))}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

où :

- m_{obj} est la masse de l'objet et \mathbf{I}_{obj} sa matrice d'inertie ;
- $\mathbf{F} = (F_1^T \ F_2^T \ F_3^T)$ est un vecteur 9×1 contenant les efforts aux points de contact, avec $F_i = (F_{ix} \ F_{iy} \ F_{iz})^T$, $i = 1,2,3$;
- $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ R_1 & R_2 & R_3 \end{bmatrix}$ est une matrice 6×9 appelée « matrice de prise », contenant le positionnement relatif des points de contact entre les trois doigts et l'objet.

Avec $R_i = \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix}$, $I_{3 \times 3}$ la matrice identité et $(x_i \ y_i \ z_i)$ le vecteur position du $i^{\text{ème}}$ point de contact par rapport au centre de gravité de l'objet.

Nous avons par l'équation (4) un système de 6 équations à 9 inconnues. C'est donc un problème d'optimisation qui se pose, dans lequel il s'agit d'obtenir les composantes du vecteur \mathbf{F} . en respectant les contraintes inégalités (6) à (8).

4 Problème d'optimisation

Afin de résoudre la stabilité dynamique du mouvement, il s'agit d'obtenir les efforts \mathbf{F} aux points de contact, or nous avons vu que l'équation (4) ne peut pas se résoudre sans ajouter d'autres contraintes.

Les forces au point de contact doivent assurer la tâche de manipulation sans glissement (équation (6)), sans perte de contact (équation (7)); ces contraintes sont données par :

$$\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{t} - \mu \cdot (\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{n}) \leq 0 \Leftrightarrow \sqrt{\|\mathbf{F}_i\|^2 - (\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{n})^2} - \mu \cdot (\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{n}) \leq 0 \quad (6)$$

$$-\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{n} \leq 0 \quad (7)$$

Où μ est le coefficient de frottement statique, \mathbf{n} est le vecteur normal à la surface de l'objet au point de contact.

Aussi, les efforts ne doivent en aucun cas être de valeur nulle. Il faut un effort de serrage minimal ξ pour chaque doigt, nous introduisons une nouvelle contrainte d'inégalité :

$$-\|\mathbf{F}_i\| + \xi \leq 0 \quad (8)$$

Ces contraintes ((6) à (9)) assureront le serrage de l'objet, qui imposeront le mouvement souhaité à l'objet, qui respecteront les lois de frottement (Coulomb), et qui seront unilatéraux.

Nous avons choisi de minimiser la fonction quadratique (9) en respectant l'égalité (4) et sous les contraintes d'inégalité (6) à (8).

$$\frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}) \quad (9)$$

Notre problème d'optimisation se résume par le système d'équations suivant :

$$\min_{\mathbf{F}} \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}) \text{ avec les contraintes } \begin{cases} \mathbf{W} \cdot \mathbf{F} = \mathbf{f} \\ \sqrt{\|\mathbf{F}\|^2 - (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n})^2} - \mu \cdot (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) \leq 0 \\ -\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \leq 0 \\ -\|\mathbf{F}\| + \xi \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Pour résoudre ce problème d'optimisation, nous avons utilisé une méthode de programmation séquentielle (SQP) implémentée dans la fonction *fmincon* de l'*Optimization Toolbox* de Matlab[®].

5 Simulation

Dans cette partie, les résultats sont présentés pour un mouvement du type « vissage d'ampoule ». Ce mouvement est composé d'un déplacement linéaire de l'objet dans l'espace, ainsi que d'une rotation suivant l'axe y (l'axe de vissage) (figure 2).

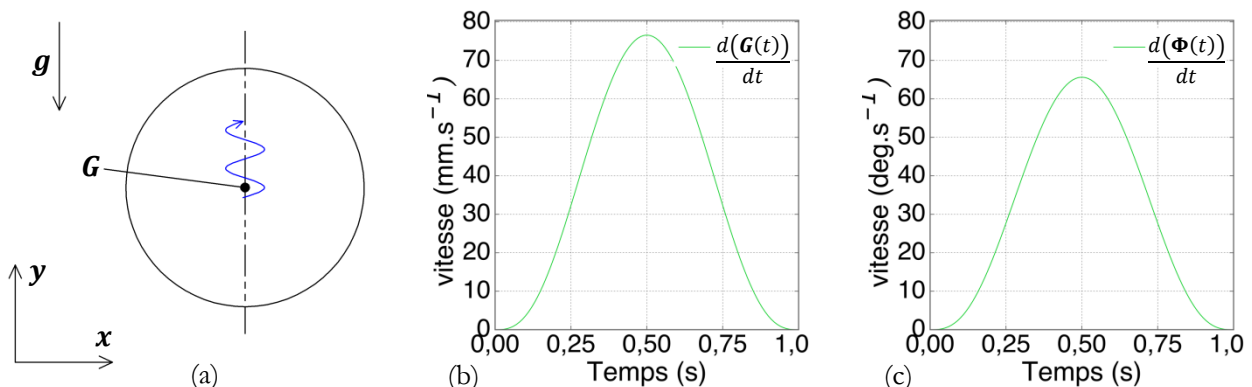


FIG. 2 – Schéma du mouvement (a) ; profil de vitesse linéaire de l'objet (b) ; profil de vitesse de rotation instantanée de l'objet (c)

Dans cet exemple, le déplacement linéaire du centre de gravité de la sphère est de 35mm ; la rotation s'effectue autour de ce même axe de translation et est de 30° ; la durée totale du mouvement est de 1s ; le

mouvement est discrétisé avec un pas de temps de 0,01s ; la masse de la sphère est de 100g ; le coefficient de frottement μ employé est de 0,5.
 La figure 3 montre quatre étapes du mouvement où sont représentées les résultantes des efforts aux points de contact P_{c_i} , $i = 1,2,3$; l'amplitude de ces vecteurs est proportionnelle aux intensités des efforts exercés.

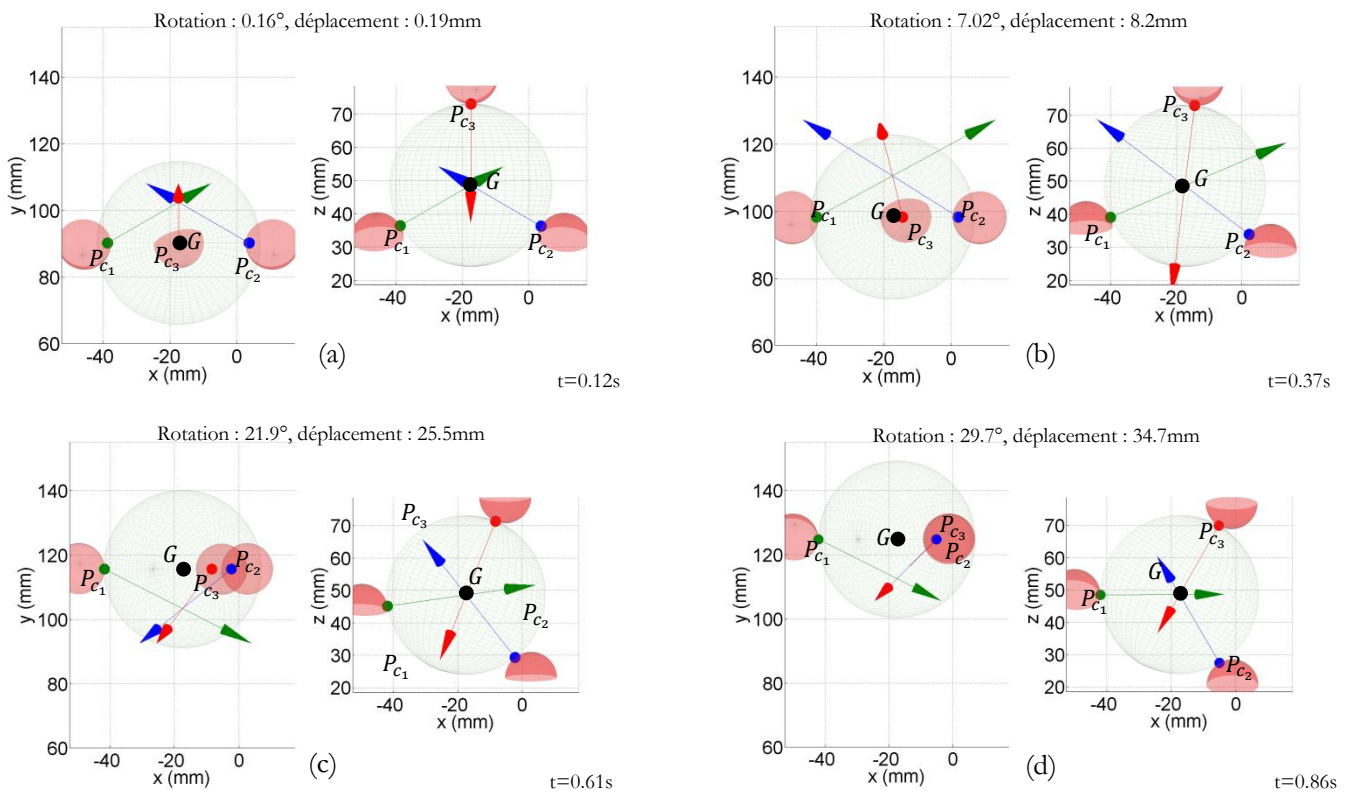


FIG. 3 – Efforts de serrage lors du mouvement du type « vissage d’ampoule » ; Vue de face à gauche et vue de dessous à droite à chaque figure.

La figure 3 (a) montre la première étape du mouvement, l’accélération est positive et augmente. A l’étape (b) l’accélération est maximale. A l’étape (c) la décélération commence. A l’étape (d), le mouvement est en cours d’arrêt. L’accélération linéaire maximale atteinte lors de cette trajectoire est de $263,9 \cdot 10^{-03} m \cdot s^{-2}$ et l’accélération angulaire maximale atteinte est de $225,3 deg \cdot s^{-2}$. Les profils d’accélération du mouvement sont affichés figure 4 (a) et (b).

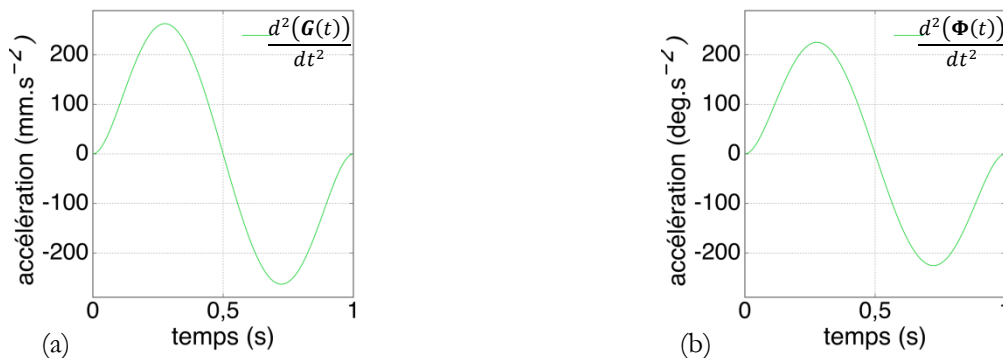
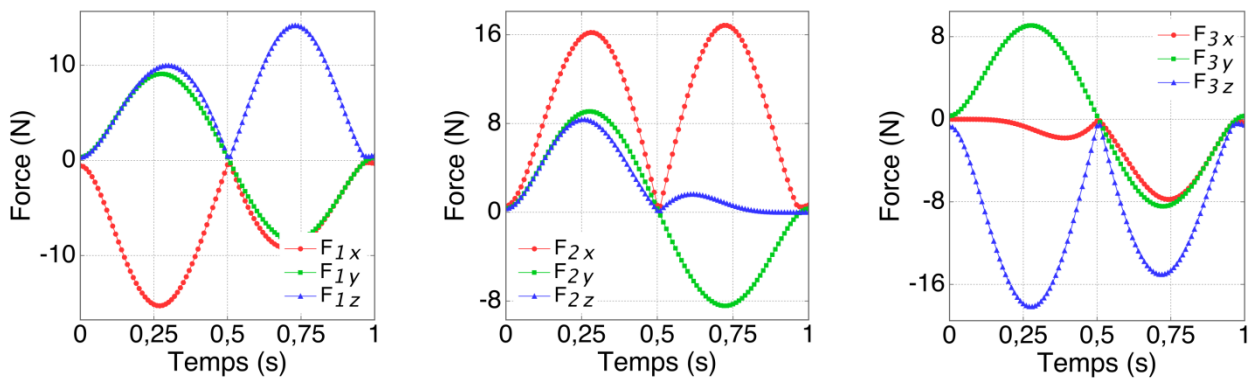


FIG. 4 – Profils d’accélération imposés à l’objet : linéaire (a) et angulaire (b)

La figure 5 montre l’évolution des efforts aux points de contact (projetés suivant les trois axes du repère de l’objet) des trois doigts calculés par optimisation. Le temps de calcul est de 1.16s avec une machine dotée d’un processeur Intel® Core™ 2 Duo E8400 cadencé à 3.00GHz et 2Go de mémoire RAM. Ce temps de calcul peut être amélioré en employant un autre code de calcul compilé. Il faut noter qu’à $t=0,5s$ les forces calculés sont très proches de zéro mais respectent la contrainte (8) afin d’assurer la stabilité dynamique même à cet instant où l’accélération de l’objet est nulle.

FIG. 5 – Efforts calculés aux points de contact $P_{C,i}$, $i = 1,2,3$

Il est observable que lors d'un seul mouvement exercé par les doigts de la main, l'amplitude des mouvements réalisables est limitée et les capacités de manipulation d'une main sont assez restreintes en termes d'espace de travail. De ce fait, il est alors possible d'employer la méthode de repositionnement de doigts (Gazeau [7]) afin d'augmenter les possibilités de manipulation.

6 Conclusion

La méthode présentée dans cet article, propose une planification de mouvement qui tient compte des aspects dynamiques. Elle est basée sur des caractères géométriques du positionnement de l'objet (positionnement à profil polynomial suivant le temps). Ces caractères sont conservés pour les trajectoires des doigts de la main en vue d'amener l'objet à suivre les chemins imposés. Nous proposons également une méthode de résolution de la stabilité dynamique de l'objet. Parallèlement à ces travaux, l'instrumentation d'une main mécanique anthropomorphe à 16 degrés de liberté et 12 actionneurs est en cours. Ce nouveau support expérimental permettra de réaliser des tâches de manipulation fine en employant la méthode décrite ici.

D'autres perspectives de ce travail concernent le « Reach & Grasp » (saisie par approche) d'objets. Ces travaux comporteront un caractère biomimétique. Ils passent par l'ajout d'un manipulateur à l'étude et l'intégration de la main mécanique en tant qu'organe effecteur de ce dernier.

L'objet de l'étude sera de définir les déterminants mécaniques qui influent lors de ce type de tâche (attraper une balle au vol par exemple), ainsi que de résoudre la stabilité dynamique du mouvement en utilisant les données obtenues. Les travaux présentés dans ce papier s'intègrent parfaitement à une dynamique « bras plus main » (ou manipulateur plus main).

References

- [1] Hong W., Slotine J.J.E., Experiments in Hand-Eye Coordination Using Active Vision, Proc. ISER, 1995.
- [2] Kang S. B., Ikeuchi K., Toward Automatic Robot Instruction from Perception – Temporal Segmentation of Tasks from Human Hand Motion, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, 11, 1995.
- [3] Lynch K. M., Mason M. T., Dynamic Manipulation With a One Joint Robot, ICRA, 1997.
- [4] Higashimori M., Kimura M., Ishii I., Kaneko M., Basic consideration on Preshaping for Capturing a Rotational Object, Proc. of the ISARC, 250-255, 2004.
- [5] Furukawa N., Namiki A., Taku S., Ishikawa M., Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, Proc. of the ICRA, 181-187, 2006.
- [6] Gazeau J. P., Zegloul S., Arsicault M., Lallemand J. P., Manipulation with the LMS mechanical hand : strategy for fingertip manipulation tasks, JESA, vol. 36, 9, 1205-1219, 2002.
- [7] Gazeau J. P., Zegloul S., Arsicault M., Fernández A., Object Manipulation Task with a dextrous mechanical hand including regrasp, WSEAS Transactions on Systems, vol. 4, 6, 815-822, 2007.
- [8] Chaigneau D., Arsicault M., Gazeau J. P., Zegloul S., LMS Robotic Hand Grasp and Manipulation Planning (An Isomorphic Exoskeleton Approach), Robotica, vol. 26, 2, 177-188, 2008.
- [9] Daoud N., Gazeau J. P., Zegloul S., Arsicault M., A fast grasp synthesis method for online manipulation, Robotics and Autonomous Systems, 2011.
- [10] Park Y. C., Starr G. P., Finger Force Computation for Manipulation of An Object by A Multifingered Robot Hand, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 689-694.