



HAL
open science

Une nouvelle main basée sur la conception de doigts aux mouvement spatiaux

Pol Hamon, Damien Chablat, Franck Plestan, Loïc Michel

► To cite this version:

Pol Hamon, Damien Chablat, Franck Plestan, Loïc Michel. Une nouvelle main basée sur la conception de doigts aux mouvement spatiaux. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03716011

HAL Id: hal-03716011

<https://hal.science/hal-03716011v1>

Submitted on 19 Jul 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.

Une nouvelle main basée sur la conception de doigts aux mouvement spatiaux

Pol Hamon^a, D. Chablat^b, Franck Plestan^c, Loïc michel^c

a. Armor Méca et École Centrale de Nantes/LS2N ZI La Grignardais et UMR CNRS 6004, 1 rue de la Noe, 22490 Pleslin-Trigavou, France et 44321 Nantes, France,

Email : Pol.Hamon@armor-meca.com

b. CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000, Nantes, France, damien.chablat@cnrs.fr

c. École Centrale de Nantes, LS2N, UMR 6004, F-44000, Nantes, France,

Franck.Plestan@ec-nantes.fr, Loic.Michel@ls2n.fr

Résumé : *Cet article présente une architecture de main avec trois doigts sous-actionnés. Chaque doigt effectue des mouvements spatiaux afin d'obtenir une saisie plus complexe et variée que les doigts à mouvements planaires existants. L'objectif de cette main est de saisir des pièces de forme complexe à la sortie des centres d'usinage. Parmi la taxonomie des préhensions, les préhensions cylindriques et sphériques sont souvent utilisées pour saisir des objets. Après une présentation de la cinématique des doigts avec les préhensions cylindriques et sphériques d'un prototype cet article propose d'aborder le problème de la stabilité pour le cas de la préhension d'un disque. Son comportement est analysé par une simulation dynamique avec le logiciel ADAMS.*

Abstract : *This article presents a hand architecture with three under-actuated fingers. Each finger performs spatial movements to achieve more complex and varied grasping than the existing planar-movement fingers. The purpose of this hand is to grasp complex-shaped workpieces as they leave the machining centers. Among the taxonomy of grips, cylindrical and spherical grips are often used to grasp heavy objects. After a presentation of the kinematics of the fingers with the cylindrical and spherical grips of a prototype, this article proposes to approach the problem of stability in the case of the gripping of a disc. Its behavior is analyzed by a dynamic simulation with the ADAMS software.*

Mots clefs : Main robotique ; doigt sous-actionnés ; mécanisme sphériques ; cinématique.

Keywords : Robotics hand ; under-actuated finger ; spherical mechanism ; kinematics.

1 Introduction

Les mains robotiques s'inspirent de celles des humains pour permettre aux robots de saisir des pièces ou des outils. Elles peuvent être utilisées pour des robots industriels, pour des robots humanoïdes ou comme prothèses pour les humains. Depuis le début des années 1980, de nombreuses mains ont été conçues comme la main Okada [1], la main Stanford/JPL [2], la main Utah/MIT [3], la main LMS [4]. Cette première génération de mains présentait de nombreux inconvénients tels que leur coût et la complexité de leur contrôle. D'autres mains ont été développées en réduisant le nombre d'actionneurs et le nombre de degrés de liberté [5], [6]. Une autre voie est la création de mains sous-actionnées permettant

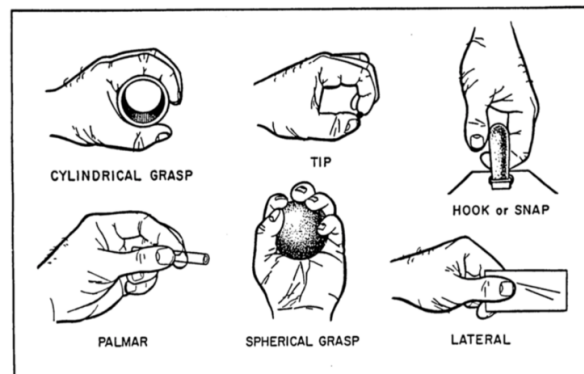


FIGURE 1 – Les saisies courante d’objets

de réduire le nombre d’actionneurs sans réduire le nombre de degrés de liberté [7]. L’architecture de ces doigts sous-actionnés n’a pas changé depuis leur origine et reste planaire. Afin de s’adapter aux objets à saisir, un mécanisme placé à la base de chaque doigt doit permettre de passer d’une prise cylindrique à une prise sphérique ou plane [7]. Dans ce cas, un ou deux actionneurs sont nécessaires pour changer le type de préhension. Cependant, parmi la taxonomie des préhensions, les préhensions cylindriques et sphériques sont principalement utilisées pour la préhension d’objets lourds [8]. Les autres types sont destinés aux tâches de précision et ne sont pas dédiés à la saisie d’objets lourds (Figure 1). Pour simplifier à la fois la conception et le contrôle, l’objectif de cet article est d’introduire une nouvelle architecture de doigt qui peut s’adapter naturellement aux formes des objets. La section suivante présente l’architecture des nouveaux doigts, la stabilité degré de liberté introduit avec cette nouvelle architecture.

2 Architecture de la nouvelle main

Le but de cet article est de présenter une nouvelle architecture de main, composée de trois doigts, l’objectif étant d’introduire un nouveau type de sous-actionnement spatial.

2.1 Architecture des nouveaux doigts

Pour réaliser des prises sphériques et cylindriques, une architecture de doigt sous-actionné est présentée avec un mécanisme sphérique pour la phalange proximale et des mécanismes à quatre barres pour les phalanges distales (Figure 2).

Cette solution apporte un nouveau degré de liberté par rapport aux doigts sous-actionnés permettant un comportement non plan comparable aux mouvements d’abduction de la main humaine et donc un changement du type de préhension. La main est un assemblage de trois doigts sous-actionnés dont le placement est défini pour réaliser les deux types de préhension. L’innovation de cette architecture vient principalement de l’utilisation du mécanisme sphérique. Afin de simplifier la géométrie du mécanisme parallèle sphérique, nous fixons les angles du mécanisme deux par deux identiques et définis comme suit $\widehat{O_2CO_3} = \widehat{O_4CO_5} = \alpha$ et $\widehat{O_3CO_4} = \widehat{O_5CO_2} = \eta$.

Les quatre degrés de liberté de chaque doigt peuvent être définis comme suit :

- Un premier degré de liberté θ_1 est défini comme le mouvement de la phalange proximale. θ_1 est l’angle entre $\overrightarrow{P_2C}$ et $\overrightarrow{P_2P_{11}}$.
- Un deuxième degré de liberté θ_2 est défini comme le mouvement du système sphérique. θ_2 est l’angle entre les plans (C, O_2, O_3) et (C, O_2, O_5)
- Un troisième degré de liberté θ_6 est défini comme le mouvement de la phalange intermédiaire. θ_6 est l’angle entre $\overrightarrow{O_5C}$ et $\overrightarrow{O_6O_7}$.
- Un quatrième degré de liberté θ_7 est défini comme le mouvement de la phalange distale. θ_7 est l’angle entre $\overrightarrow{O_7O_6}$ et $\overrightarrow{O_7P_8}$.

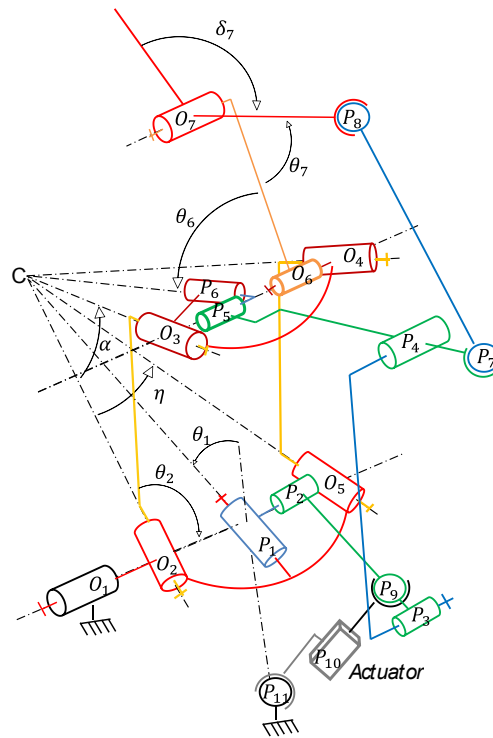


FIGURE 2 – Cinématique de la nouvelle architecture des doigts

En utilisant la trigonométrie sphérique [9] (Eq. (1)) et les résultats provenant de l'étude des mécanismes sphériques parallèles [10] (Eq. (2)), On trouve les angles θ_1 , θ_2 , θ_6 et θ_7 telle que le doigt se trouve à la verticale avec toutes ses phalanges alignées. Cette position est utilisée comme position initiale :

$$\theta_{1home} = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{-\sin^2 \left(\frac{\eta}{2} \right) + \cos(\alpha)}{\cos^2 \left(\frac{\eta}{2} \right)} \right) \quad (1)$$

$$\theta_{2home} = -2 \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{-\tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \tan \left(\frac{\eta}{2} \right) - 1}{\tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \tan \left(\frac{\eta}{2} \right) - 1}} \right) \quad (2)$$

$$\theta_{6home} = -\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{2 \cos(\alpha) + \cos(\eta) - 1}{\cos(\eta) + 1} \right) - \pi/2 \quad (3)$$

$$\theta_{7home} = \pi - \delta_7 \quad (4)$$

Les angles sont définis comme positifs dans le sens de la fermeture des doigts.

2.2 La préhension et la position des doigts

La figure 3 montre le positionnement idéal des doigts pour passer d'une prise prismatique à une prise sphérique. Les lignes (I_1G_1) , (I_2-0G_2) , (I_3-0G_3) représentent l'orientation d'un vecteur normal sur la surface de l'articulation distale lorsque les trois doigts sont en position neutre, les lignes (I_1G_1) , (I_2-1G_1) , (I_3-1G_1) l'orientation d'un vecteur normal à la surface de l'articulation distale lorsque les trois doigts sont en position pour effectuer une préhension cylindrique et les lignes (I_1G_1) , (I_2-2G_2) , (I_3-2G_3) l'orientation d'un vecteur normal à la surface de l'articulation distale lorsque les trois doigts sont en position pour effectuer une préhension sphérique. Les points G_1 , G_2 , G_3 correspondent au point C (Figure 2) de chaque doigt.

La figure 4(a) montre un exemple de prise sphérique avec un prototype de la main et la figure 4(b) la prise cylindrique.

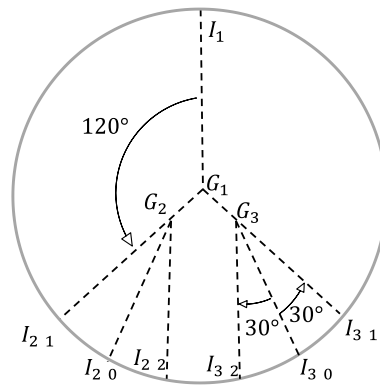


FIGURE 3 – Positions des doigts pour saisir des objets neutres, cylindriques et sphériques

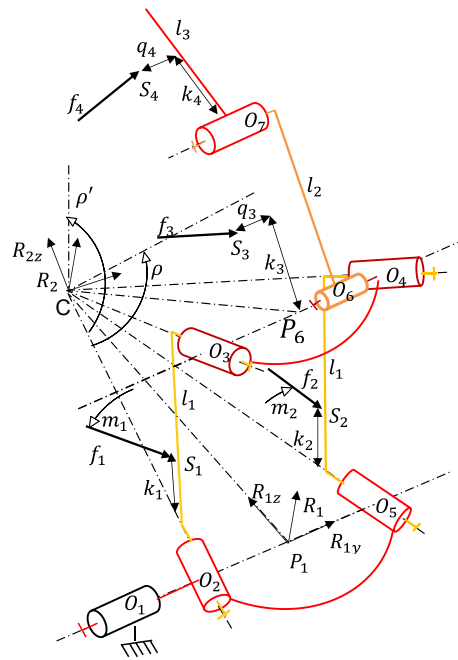


(a)



(b)

FIGURE 4 – (a) préhension sphérique et (b) préhension cylindrique réalisées avec la nouvelle architecture de doigt et un actionnement avec 3 muscles pneumatiques

FIGURE 5 – matrice des couples \mathbf{J}

3 Analyse de la stabilité

Nous réalisons une analyse de la stabilité d'un doigt lors de la préhension d'un disque comme présenté en 4(a). Cette surface convexe va générer un mouvement d'abduction du doigt. Lors de cette préhension un seul contact est réalisé sur la phalange digitale. Ce contact génère une force f_4 au point S_4 aussi les forces f_1, f_2, f_3 sont dans notre cas sont nuls. On définit 4 matrices, \mathbf{f} la matrice des forces extérieures dans notre cas uniquement f_4 , \mathbf{J} la matrice des couples sur les degrés de liberté en fonction de la force f_4 , \mathbf{T} la matrice des rapports de couple du mécanisme de transmission et \mathbf{t} la matrice de la force d'entrée appliquée par l'actionneur.

3.1 Matrice des moments \mathbf{J}

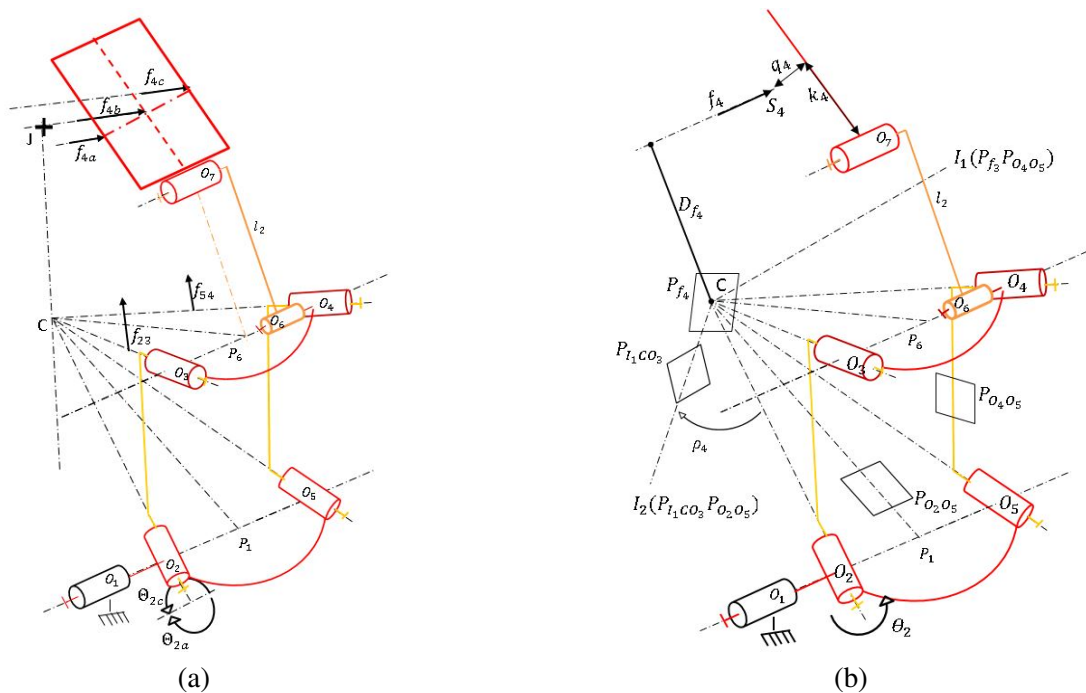
$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\Theta_1}{f_1} & \frac{\Theta_2}{f_1} & 0 & 0 \\ \frac{\Theta_1}{f_2} & \frac{\Theta_2}{f_2} & 0 & 0 \\ \frac{\Theta_1}{f_3} & \frac{\Theta_2}{f_3} & \frac{\Theta_6}{f_3} & 0 \\ \frac{\Theta_1}{f_4} & \frac{\Theta_2}{f_4} & \frac{\Theta_6}{f_4} & \frac{\Theta_7}{f_4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

où $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_6, \Theta_7$ sont les couples autour des axes des articulations O_1, O_2, O_6, O_7 respectivement. Les rapports $\frac{\Theta_7}{f_4}, \frac{\Theta_6}{f_4}$, sont calculés de la même manière que dans le cas planaire [11] :

$$\frac{\Theta_7}{f_4} = k_4 \quad \frac{\Theta_6}{f_4} = k_4 - l_2 \cos(\delta_7 + \theta_7) \quad (6)$$

Enfin le ratio $\frac{\Theta_1}{f_4}$ s'écrit comme suit dans R_1

$$\frac{\Theta_1}{f_4} = (S_{4x}f_{4z} - S_{4z}f_{4x}) \quad (7)$$

FIGURE 6 – (a) Stabilité de l'abduction avec une force (b) Moment du couple de f_4 sur O_2 .

avec

$$[f_{4x} \ f_{4y} \ f_{4z} \ 1]^t = Rot_x\left(\frac{-\eta}{2}\right)Rot_z(\theta_2)Rot_x(\alpha)Rot_z(\theta_3) \\ Rot_x\left(\frac{\eta}{2}\right)Rot_y(\theta_6)Rot_y(\theta_7) [1 \ 0 \ 0 \ 0]^t \quad (8)$$

$$[S_{4x} \ S_{4y} \ S_{4z} \ 1]^t = Trans_z(z_1)Rot_x\left(\frac{-\eta}{2}\right)Rot_z(\theta_2)Rot_x(\alpha)Rot_z(\theta_3) \\ Rot_x\left(\frac{\eta}{2}\right)Trans_z(-z_1)Rot_y(\theta_6)Trans_z(l_2)Rot_y(\theta_7) \\ Trans_z(k_4)Trans_y(q_4) [0 \ 0 \ 0 \ 1]^t \quad (9)$$

On peut définir le sens du moment $\frac{\Theta_2}{f_4}$ comme ceci : si la force est à gauche de la droite CJ le couple Θ_2 est dans la direction antitrigonométrique (Figure 6 (a) Θ_{2a} et f_{4a}) et si la force est à droite de la droite CJ le couple Θ_2 est dans la direction trigonométrique (Figure 6(a) Θ_{2c} et f_{4c}). Avec la ligne CJ la ligne d'intersection entre les plans des deux éléments O_2O_3 et O_4O_5 . Si la force est sécante, le couple Θ_2 est nul (Figure 6(a)).

Enfin, pour trouver $\frac{\Theta_2}{f_4}$, on définit une force f_4 au point S_4 de la phalange digitale (Figure 6(b)). Ainsi, L'élément O_3O_4 est soumis à 3 forces, la force f_4 et les deux forces des éléments O_2O_3 et O_4O_5 . On appelle D_{f_4} la plus courte distance entre l'axe de la force f_4 et le point C . On définit un plan P_{f_4} tel que la force f_4 et le point C soient inclus dans ce plan. Le plan $P_{O_4O_5}$ est le plan qui inclut les points O_4 , O_5 et C . ces deux plans forment une ligne d'intersection $L_1(P_{f_4}P_{O_4O_5})$ passant par le point $I_1(P_{f_4}P_{O_4O_5})$. Un nouveau plan est créé $P_{I_1CO_3}$ avec les deux lignes $L_1(P_{f_4}P_{O_4O_5})$ et $C0_3$. Les trois plans P_{f_4} , $P_{O_4O_5}$, $P_{I_1CO_3}$ définissent un triangle de force. Nous pouvons maintenant trouver la force f_{CO_3} appliquée sur l'axe CO_3 .

$$f_{CO_3} = \frac{\sin(\widehat{O_3I_1O_4})}{\sin(\widehat{I_1O_4O_3})} f_4$$

TABLE 1 – Paramètres de conception du doigt

l_1	l_2	l_3	a_0	a_{123}	b_i	c_0	c_{123}	k_{12}	k_3	k_4	q_i	δ_7	α	η	f_{10}
61	41	38	100	38	58	28	16	$l_1/2$	$l_2/2$	$l_3/2$	0	$\pi/2$	85deg	40deg	1 N

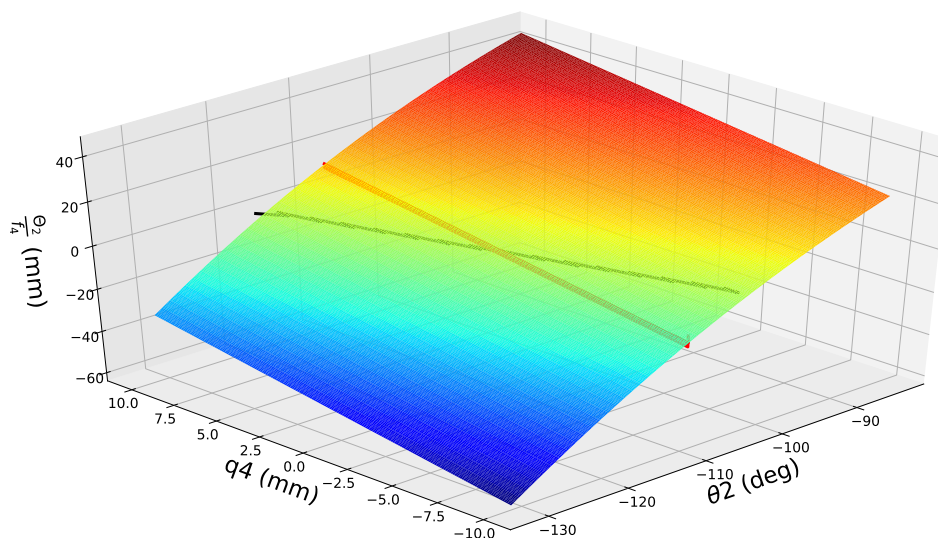
L'angle ρ_4 est l'angle entre le plan $P_{I_1CO_3}$ et la ligne CO_2 .

$$\Theta_2 = f_{CO_3} D_{f_4} \sin(\rho_2) \quad (10)$$

$$\frac{\Theta_2}{f_4} = \frac{\sin(\widehat{O_3 I_1 O_4})}{\sin(\widehat{I_1 O_4 O_3})} D_{f_4} \sin(\rho_4) \quad (11)$$

La Figure 7 montre le rapport $\frac{\Theta_2}{f_4}$. Avec les paramètres de conception du doigt définis dans le tableau 1. On fait varier de q_4 de $-10mm$ à $+10mm$ et $\theta_1, \theta_6, \theta_7$, en position initiale. La ligne rouge montre la position initiale de θ_2 et la ligne noire l'ensemble des configurations où le rapport $\frac{\Theta_2}{f_4}$ est nul.

Dans le cas de la préhension d'un objet convexe où le premier contact se fait sur le bord de la phalange avec $q_4 = -10mm$, un couple négatif est généré. La position de stabilité ne sera possible qu'avec un q_4 positif ce qui est peu probable d'être atteint rapidement, d'où l'importance du système d'activation dans la stabilisation de l'abduction.

FIGURE 7 – le rapport $\frac{\Theta_2}{f_4}$ en fonction de θ_2 et q_4 .

3.2 Matrice des rapports transmission des couples \mathbf{T}

Le comportement du mécanisme d'actionnement est donné par la matrice \mathbf{T} et par la figure 8.

Le mécanisme d'actionnement est constitué de quatre boucles :

- Une boucle (*boucle*₁) avec cinq liaisons pivots (O_2, O_3, P_6, V_1, P_1). En entrée, cette boucle possède deux degrés de liberté mais un seul si l'on considère le mécanisme sphérique comme passive. Ce dll peut être modélisé selon θ_2 . La sortie du mécanisme peut être modélisée selon ψ_1, ν_1, ψ_6 . V_1 est une liaison virtuelle [12]. Nous calculons donc trois rapports de couple $\frac{\Gamma_1}{\Theta_2}$, $\frac{N_1}{\Theta_2}$ et $\frac{\Gamma_6}{\Theta_2}$.

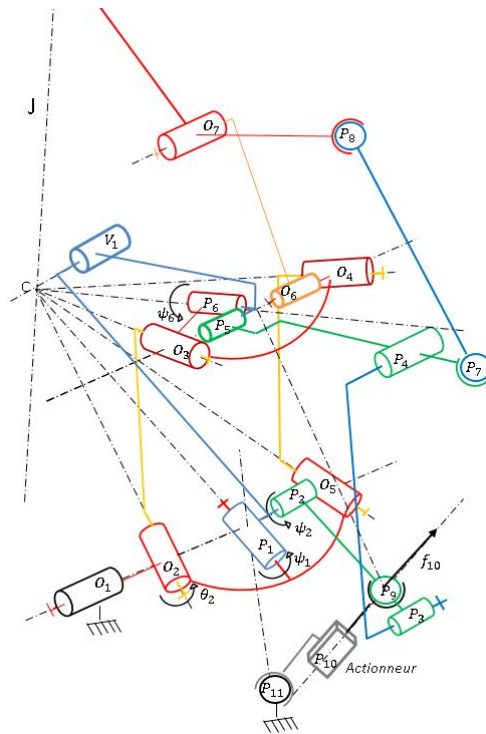


FIGURE 8 – Mécanisme d'activation du doigt

- Une boucle (*boucle*₂) avec quatre liaisons pivots (P_5, P_6, O_6, O_7) et deux liaisons rotules (P_8, P_7). En entrée, cette boucle correspond à un mécanisme à trois degrés de liberté qui peut être modélisé selon $\theta_7, \psi_6, \theta_6$. La sortie du mécanisme peut être modélisée selon ψ_5 . Nous calculons donc trois rapports de couple $\frac{\Gamma_5}{\theta_7}, \frac{\Gamma_5}{\Gamma_6}$ et $\frac{\Gamma_5}{\theta_6}$.
- Une liaison planaire à cinq barres (*boucle*₃) (P_2, P_3, P_4, P_5, V_1) qui est reliée au mécanisme sphérique par deux liaisons pivots P_1 et P_6 qui sont concourants au centre du mécanisme sphérique C et inscrits dans le plan perpendiculaire aux liaisons du mécanisme planaire à cinq barres. Les articulations (P_1, P_2) et (P_5, P_6) sont équivalentes à un cardan. Cette boucle possède deux degrés de liberté qui peuvent être modélisés selon ν_1, ψ_5 . La sortie du mécanisme peut être modélisée selon ψ_2 . Nous calculons deux rapports de couple : $\frac{\Gamma_2}{N_1}$ et $\frac{\Gamma_2}{\Gamma_5}$.
- Une liaison glissière actionnée P_{10} reliée par deux rotules (P_9, P_{11}) et trois liaisons pivots (O_1, P_1, P_2) (*boucle*₄). En entrée, cette boucle forme un mécanisme à trois degrés de liberté qui peut être modélisé selon θ_2, ψ_1, ψ_2 . La sortie de ce mécanisme est l'articulation glissière P_{10} . Nous calculons donc trois rapports de forces : $\frac{F_{10}}{\Theta_1}, \frac{F_{10}}{\Gamma_1}$ et $\frac{F_{10}}{\Gamma_2}$.

A partir des calculs [12], il est maintenant possible d'écrire la matrice \mathbf{T} comme suit

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\frac{F_{10}}{\Theta_1} & -\frac{F_{10}}{\Theta_2} & -\frac{\Gamma_5}{\Theta_6} \frac{\Gamma_2}{\Gamma_5} \frac{F_{10}}{\Gamma_2} & -\frac{\Gamma_5}{\Theta_7} \frac{\Gamma_2}{\Gamma_5} \frac{F_{10}}{\Gamma_2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{Où } \frac{F_{10}}{\Theta_2} = \left(\frac{\Gamma_1}{\Theta_2} \frac{F_{10}}{\Gamma_1} + \frac{N_1}{\Theta_2} \frac{\Gamma_2}{N_1} \frac{F_{10}}{\Gamma_2} + \frac{\Gamma_6}{\Theta_2} \frac{\Gamma_5}{\Gamma_6} \frac{\Gamma_2}{\Gamma_5} \frac{F_{10}}{\Gamma_2} \right)$$

que l'on peut décomposer comme ceci :

- le premier terme $(\frac{F_{10}}{\Theta_2})_1 = (\frac{\Gamma_1}{\Theta_2} \frac{F_{10}}{\Gamma_1})$ est la contribution de la *boucle*₁ et de la *boucle*₄ (Figure 9(a)).
- le deuxième terme $(\frac{F_{10}}{\Theta_2})_2 = (\frac{N_1}{\Theta_2} \frac{\Gamma_2}{N_1} \frac{F_{10}}{\Gamma_2})$ est la contribution de la *boucle*₃ (Figure 9(b)).
- le troisième terme $(\frac{F_{10}}{\Theta_2})_3 = (\frac{\Gamma_6}{\Theta_2} \frac{\Gamma_5}{\Gamma_6} \frac{\Gamma_2}{\Gamma_5} \frac{F_{10}}{\Gamma_2})$ est la contribution de la *boucle*₂ et de la *boucle*₄ (Figure 9(c)).

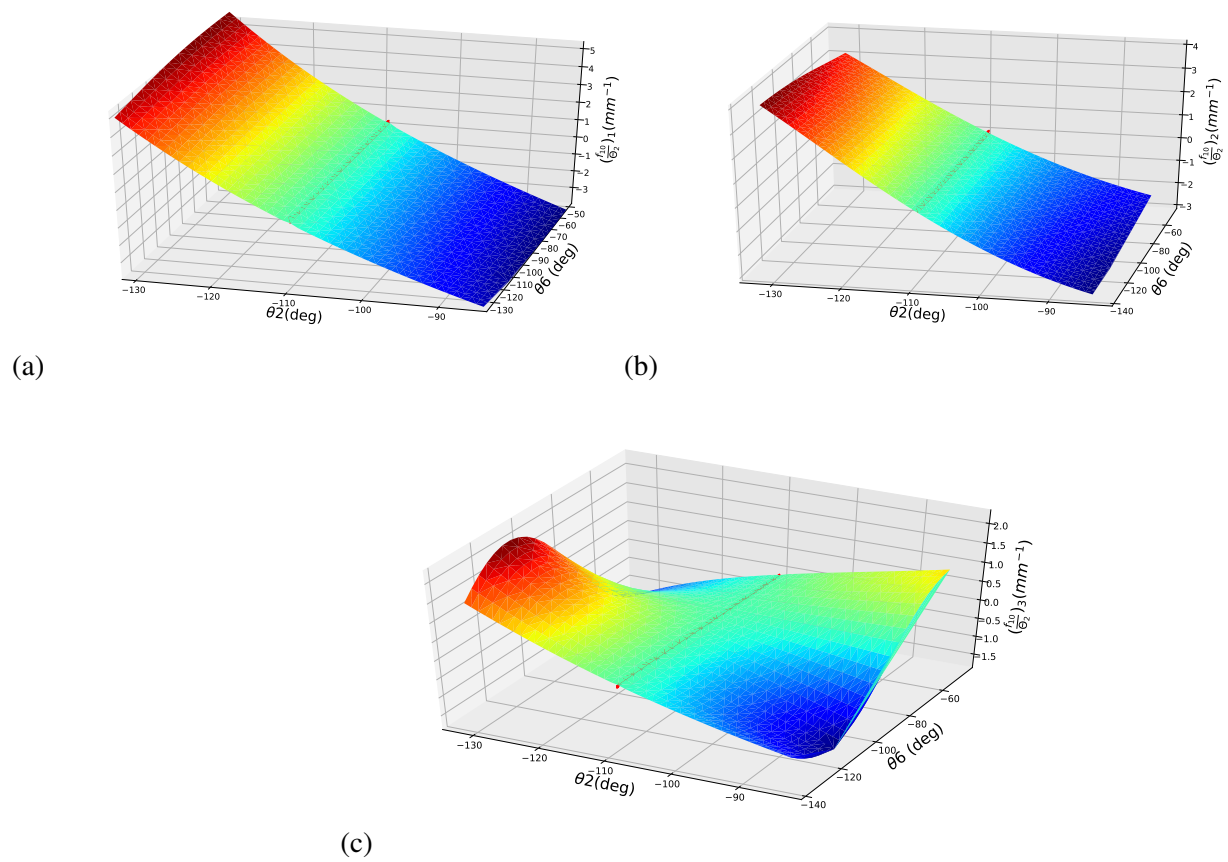


FIGURE 9 – Décomposition du calcul du rapport de transmission entre θ_2 et f_{10}

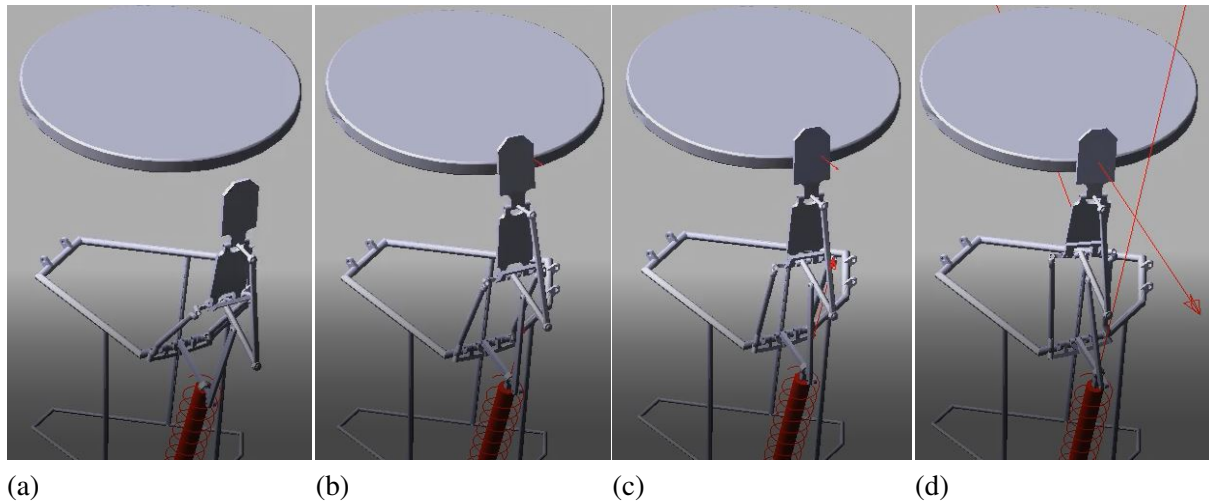


FIGURE 10 – Dynamic simulation with Adams software

On peut voir que le système sphérique (*boucle*₁) et le système plan (*boucle*₃) ont toujours une contribution positive au rétablissement du doigt vers sa position initiale en abduction (*theta*₂) et que leurs contributions sont équivalentes. Le système RSSR (*boucle*₂) peut lui avoir une action déstabilisante quand le segment 0_5O_7 passe la droite CO_5 mais son action est beaucoup plus faible que le reste du mécanisme sur le mouvement d'abduction du doigt.

3.3 Critère de stabilité

Il y a stabilité si $F_{10}/(\frac{F_{10}}{\Theta_2}) = -\frac{\Theta_2}{f_4} f_4$ or les forces F_{10} et f_4 sont aussi liées par les contraintes en flexions avec $F_{10} = f_4 \frac{\Theta_7}{f_4} \frac{F_{10}}{\Theta_7}$

4 Simulation avec ADAMS Software

Une simulation avec le logiciel de calcul dynamique ADAMS Software est réalisée pour montrer le comportement du doigt lors de la préhension d'un disque de 80mm de diamètre et fixe avec la base du doigt. Dans cette simulation, on impose un mouvement sur la liaison prismatique d'activation du mécanisme P_{10} et l'on observe l'évolution des forces f_{10} sur cette liaison et de la force de contact f_4 du doigt sur l'objet. Des ressorts sont utilisés sur les 4 degrés de liberté pour assurer la tenue mécanique du mécanisme, $10(N/m)$ sur les liaisons O_1 , O_6 , O_7 en flexions et $1(N/m)$ sur les liaisons O_2 et O_5 à la base du système sphérique, deux ressorts sont nécessaires pour ddl en abduction pour obtenir un comportement symétrique. Dans la Figure 11 et entre 0s et 0.7s de la Figure 10 (a), le doigt réalise son approche. A 0.7s (Figure 10 (b)) il y a le premier contact qui génère l'abduction du doigt de 0,7s à 0,87s (Figure 10 (c)). A 0.87s, le doigt a trouvé une position de stabilité en abduction, il y a encore des mouvements en flexion de 0,87s à 0,93s. A 0,93s, tous les degrés de liberté ont soit trouvé une position de stabilité, soit rencontré une butée articulaire. Le doigt ne peut alors plus bouger et les efforts f_{10} d'activation et f_4 de contact partent à l'infini (Figure 11 et Figure 10 (d)).

5 Conclusions

La principale contribution de cet article est une nouvelle cinématique permettant des saisies complexes avec un mécanisme spatial sous-actionné. Un mécanisme parallèle sphérique a été ajouté aux doigts classiques sous-actionnés afin d'ajuster les doigts d'une position neutre à une prise sphérique ou cylindrique. La stabilité de cette nouvelle main robotique a été analysée dans un cas particulier. Dans cet article, l'interaction entre les différents doigts pour permettre une prise stable n'est pas étudiée et fera

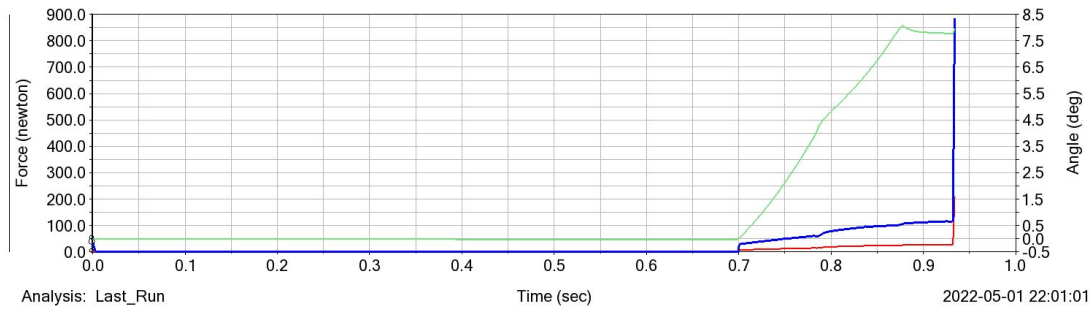


FIGURE 11 – Les forces f_{10} (N) en bleu et f_4 (N) en rouge, en vert l'angle $\theta_2 - \theta_{2home}$ (deg)

l'objet de travaux ultérieurs. Des travaux futurs seront également menés pour optimiser les paramètres de conception des doigts pour une famille de pièces issue de l'industrie.

Remerciements

Ce travail est issu d'une thèse de doctorat soutenue par l'ANRT (programme CIFRE).

Références

- [1] Okada, T., 1982, "Computer control of multijointed finger system for precise object-handling," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **12**(3), pp. 289–299.
- [2] Salisbury, J. K. and Craig, J. J., 1982, "Articulated hands : Force control and kinematic issues," *The International journal of Robotics research*, **1**(1), pp. 4–17.
- [3] Jacobsen, S., Iversen, E., Knutti, D., Johnson, R., and Biggers, K., 1986, "Design of the Utah/MIT dextrous hand," *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, IEEE, San Francisco, California, USA, pp. 1520–1532.
- [4] Gazeau, J.-P., Zehloul, S., Arsicault, M., and Lallemand, J.-P., 2001, "The LMS hand : force and position controls in the aim of the fine manipulation of objects," *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, IEEE, Seoul, Korea, pp. 2642–2648.
- [5] Akin, D. L., Carignan, C. R., and Foster, A. W., 2002, "Development of a four-fingered dexterous robot end effector for space operations," *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, IEEE, Washington, DC, USA, pp. 2302–2308.
- [6] Crisman, J. D., Kanojia, C., and Zeid, I., 1996, "Graspar : A flexible, easily controllable robotic hand," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **3**(2), pp. 32–38.
- [7] Laliberté, T. and Gosselin, C. M., 1998, "Simulation and design of underactuated mechanical hands," *Mechanism and machine theory*, **33**(1-2), pp. 39–57.
- [8] Cutkosky, M. R. et al., 1989, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Transactions on robotics and automation*, **5**(3), pp. 269–279.
- [9] Todhunter, I., 1863, *Spherical trigonometry, for the use of colleges and schools : with numerous examples*, Macmillan.
- [10] McCarthy, J. M. and Soh, G. S., 2010, *Geometric design of linkages*, Vol. 11, Springer Science & Business Media.
- [11] Birglen, L., Laliberté, T., and Gosselin, C. M., 2007, *Underactuated robotic hands*, Vol. 40, Springer.
- [12] Hamon, P., Chablat, D., and Plestan, F., 2021, "A new robotic hand based on the design of fingers with spatial motions," *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 85451, American Society of Mechanical Engineers, Virtual, USA, p. V08BT08A021.