

Linéarisation à rétroaction partielle d'un robot parallèle commandé par câble

Atal Anil Kumar^a, Jean-François Antoine^a, Gabriel Abba^a

a. Université de Lorraine, Arts et Métiers ParisTech, LCFC, F-57000 Metz, France
(e-mails: atal-anil.kumar@univ-lorraine.fr, jean-francois.antoine@univ-lorraine.fr,
gabriel.abba@univ-lorraine.fr)

Abstract

Cet article présente la commande d'un robot parallèle à câble (RPC) avec une technique de linéarisation à rétroaction partielle. Le modèle dynamique du RPC est d'abord formulé en tenant compte des taux d'angle d'Euler. Ensuite, une méthode de linéarisation à rétroaction partielle est mise en œuvre pour découpler la sortie et l'entrée. Un contrôleur à rétroaction linéaire est ensuite conçu à l'aide d'une méthode de placement des pôles pour contrôler le RPC. La loi de contrôle est ensuite vérifiée par simulation à l'aide du logiciel MATLAB. Des trajectoires simples sont ensuite testées pour analyser le comportement de la loi de contrôle

Mots clés : linéarisation à rétroaction partielle, robot parallèle à câble, placement des poles, commande

1 Introduction

Les Robots Parallèles à Câbles (RPC) sont constitués d'une partie mobile appelée la plate-forme reliée par des câbles à une structure fixe. La position et l'orientation de la plate-forme sont contrôlées par l'intermédiaire des longueurs des câbles [1]. RPC présentent de nombreux avantages par rapport aux robots traditionnels à liaison série et autres robots de type parallèle en termes de capacité de charge élevée, faible inertie, efficacité énergétique élevée, grand espace de travail, etc. En plus de cela, ils sont également facilement reconfigurables, moins coûteux à construire, faciles à transporter, à assembler et à démonter, etc [2]. Cependant, le contrecoup de ces avantages est dû à l'utilisation de câbles pour réaliser l'actionnement du RPC. Les câbles doivent rester en tension, un câble ne pouvant exercer un effort que dans un seul sens. L'actionnement par câbles présente donc une difficulté de commande supplémentaire puisqu'il faut veiller à la faisabilité de la tension demandée [3].

Les RPC sont principalement classés comme étant surcontraints, pleinement contraints et sous-contraints [4]. Un RPC avec m -câbles et n - degrés de liberté (ddl) est considéré comme totalement contraint s'il possède un câble de plus que le nombre de degrés de liberté, c'est-à-dire $m > n + 1$. Dans un tel type de RPC, tous les degrés de liberté peuvent être contrôlés par les câbles. Un RPC surcontraint a la condition $m > n + 1$. Un RPC sous-contraint est un RPC dont le nombre de câbles est inférieur ou égal au nombre de degrés de liberté, par exemple $m \leq n$. De tels RPCs ont tout au plus une solution

réalisable pour les tensions de câbles et dépendent principalement de la gravité pour maintenir les câbles tendus. Les RPC avec un nombre limité de câbles sont utilisés dans plusieurs applications pour lesquelles la tâche à effectuer nécessite un nombre limité de libertés contrôlées ou pour lesquelles une limitation de dextérité est acceptable afin de réduire la complexité, le coût, le temps de configuration, la probabilité d'interférence du câble, etc. [5].

Le contrôle des RPC a reçu beaucoup d'intérêt de la part d'un certain nombre de chercheurs. Plusieurs approches ont été utilisées par la communauté de recherche pour le contrôle des RPC, notamment le contrôle basé sur Lyapunov [6], le mode glissant [7], le contrôle fuzzy plus PI [8], etc. Cependant, très peu de travaux sont disponibles sur la lutte contre les RPC sous-contraints. Certaines de ces approches sont la planification dynamique de trajectoire [9], la génération de trajectoire anti-cheminement basée sur la mise en forme d'entrée [10], le schéma de mise en forme d'entrée sans vibration [11], le contrôle basé sur le plan [12], la planification de trajectoire de repos à repos [5] et autres.

La linéarisation par rétroaction est l'une des techniques de contrôle non linéaire les plus importantes qui permet d'avoir un système linéaire exactement équivalent en utilisant la transformation de coordonnées et la rétroaction d'état [13]. La linéarisation par rétroaction entrée-sortie présente plusieurs avantages par rapport aux régulateurs traditionnels tels que les régulateurs PID qui ne prennent pas en compte les facteurs non linéaires d'un système. En contrepoint, les non-linéarités du système considéré sont annulées dans la technique de linéarisation par rétroaction. Cependant, un modèle précis du système est nécessaire pour obtenir une bonne action de contrôle en utilisant la méthode de linéarisation par rétroaction [14].

La principale contribution de ce travail est de démontrer l'application de la méthode de linéarisation à rétroaction partielle pour la commande d'un robot spatial parallèle sous-contraint à 4 câbles. La nouveauté de l'ouvrage est qu'il considère les six degrés de liberté et analyse l'influence de la loi de contrôle sur les degrés de liberté incontrôlés. Comme le nombre de câbles (4) est inférieur au nombre de degrés de liberté de la plate-forme (6), la plate-forme dispose d'un degré supplémentaire de liberté de mouvement qui entraîne une dynamique interne indésirable, ce qui limite l'espace de travail contrôlable de la plate-forme [11]. Le calcul de l'espace de travail d'équilibre statique pour le RPC est calculé par les auteurs dans [15]. Ensuite, le modèle dynamique du RPC est formulé. À partir des résultats obtenus lors des études précédentes, un schéma de contrôle non-linéaire est développé à l'aide de la technique de linéarisation entrée-sortie. Les résultats de la simulation indiquent que ce schéma peut être appliqué pour le contrôle du RPC conceptualisé.

Le document est organisé comme suit: la section 2 présente le modèle dynamique du RPC suivi de la section 3 qui présente les équations et les étapes nécessaires à la linéarisation du retour d'information entrée-sortie en général. La mise en œuvre de la technique de contrôle du RPC est présentée à la section 4, suivie des résultats à la section 5. La conclusion et les travaux futurs sont présentés dans la dernière section du document.

2 Modèle dynamique du robot parallèle à câble

Les équations utilisées dans la modélisation du RPC sont présentées dans cette section. Les méthodes de modélisation et d'analyse développées pour les manipulateurs de liaisons rigides conventionnels ne

peuvent être appliquées directement aux robots entraînés par câble en raison des contraintes unilatérales où les tensions dans les câbles doivent être considérées.

Une schématique générale d'un robot parallèle à câble est montrée dans fig.1.

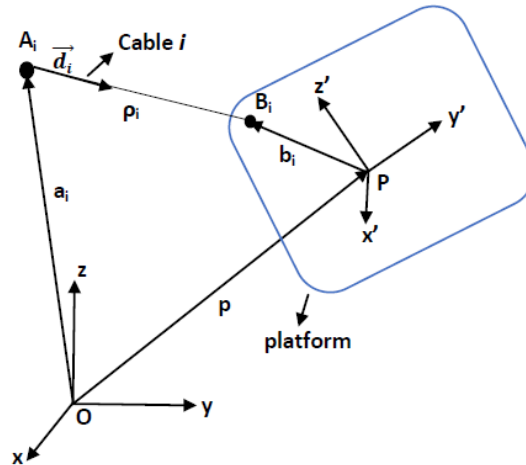


Figure 1 : Une esquisse générale d'un RPC

Un repère fixe (O, x, y, z) fixé à la base d'un RPC est appelé le repère de base. Un repère mobile (P, x', y', z') est fixé à la plate-forme mobile où P est le point de référence de la plate-forme à positionner par le mécanisme. De (fig. 1), a_i et b_i sont respectivement définis comme le point de connexion vectoriel O au point A_i et le point de connexion vectoriel P de la plate-forme au point B_i , les deux vecteurs étant exprimés dans le repère de base. La position p de la plate-forme mobile est donnée par \overline{OP} . Certaines hypothèses sont faites pour réduire la complexité du calcul dans la procédure de modélisation [2]:

- 1) La masse des câbles est négligeable et les câbles ne sont pas élastiques.
- 2) Le $i^{\text{ème}}$ câble est supposé tendu entre les points et est donc considéré comme un segment droit et est indiqué par ρ_i .
- 3) La plate-forme mobile est supposée être un corps rigide, défini par sa masse et sa matrice d'inertie.

Les équations de mouvement d'un RPC peuvent être dérivées à l'aide de formules de Newton-Euler, à condition que tous les câbles soient en tension, comme indiqué en (1) [16].

$$\begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ \omega \times I_P \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} = -J^T \tau \quad (1)$$

Dans cette équation, m représente la masse de l'effecteur final, I_P est une matrice 3×3 et représente le tenseur d'inertie de l'effecteur final autour du point P dans le cadre de base, $I_{3 \times 3}$ est une matrice d'identité 3×3 , g représente le vecteur accélération gravité, τ désigne le vecteur des forces des câbles tandis que scalar t_i désigne la force de tension du $i^{\text{ème}}$ câble, $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ désigne le vecteur vitesse de l'orientation, $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ désigne le vecteur position. Considérons $X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ comme vecteur de coordonnées généralisées, dans lequel $\theta = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ désigne le vecteur d'un ensemble d'angles Euler. Avec cette définition, la matrice de rotation peut être écrite en termes d'angles d'Euler comme :

$$R = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma s\beta + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -c\gamma s\alpha + c\alpha s\beta s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

où, s et c représentent respectivement les fonctions \sin et \cos . La vitesse angulaire de l'effecteur final peut s'écrire sous la forme suivante

$$\omega = E\dot{\theta} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = [\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}]^T \quad (4)$$

dans laquelle,

$$E = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \cos(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Les équations du mouvement peuvent être écrites en termes de X en utilisant les notations définies ci-dessus. Par quelques manipulations ces équations peuvent être dérivées comme,

$$M(X)\ddot{X} + C(X, \dot{X})\dot{X} + G(X) = -J^T \tau \quad (6)$$

dans laquelle,

$$M(X) = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_p E \end{bmatrix}$$

$$C(X, \dot{X})\dot{X} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ I_p \dot{E} \dot{\theta} + (E\dot{\theta}) \times I_p (E\dot{\theta}) \end{bmatrix}$$

$$C(X, \dot{X}) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_p \dot{E} + (E\dot{\theta})_{\times} (I_p E) \end{bmatrix}$$

$$G(X) = \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

dans laquelle la matrice $(E\dot{\theta})_{\times}$ est une matrice asymétrique définie par les composantes du vecteur vitesse angulaire comme suit

$$(E\dot{\theta})_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

La transposition jacobienne du RPC est donnée par

$$J^T = \begin{bmatrix} d_1^0 & \dots & d_i^0 & \dots \\ b_1^0 \times d_1^0 & \dots & b_i^0 \times d_i^0 & \dots \end{bmatrix}$$

L'équation (6) est finalement représentée comme suit

$$M(X)\ddot{X} + N(X, \dot{X})\dot{X} = -J^T \tau \quad (8)$$

où,

$$N(X, \dot{X})\dot{X} = C(X, \dot{X})\dot{X} + G(X)$$

L'équation (8) est ensuite utilisée pour la mise en œuvre de la linéarisation à rétroaction partielle.

3 Linéarisation à rétroaction partielle

L'approche mathématique de la méthode de linéarisation par rétroaction partielle pour un système dynamique MIMO non linéaire de $n^{ième}$ ordre avec m entrées et sorties est présentée dans cette section. Une explication plus détaillée de la technique se trouve dans [17].

Considérez un système MIMO décrit dans le formulaire affine comme indiqué ci-dessous :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g_1(x, t)u_1(t) + \dots + g_m(x, t)u_m(t) \quad (9)$$

$$y_1(t) = h_1(x, t)$$

$$\dots$$

$$y_m(t) = h_m(x, t)$$

Le principe de base de la méthode de linéarisation à rétroaction partielle est de trouver une transformation d'entrée dans la forme

$$u_i = \alpha_i(x) + \beta_i(x)v_i \quad (10)$$

où, v_i est la nouvelle entrée, $\alpha_i(x)$, et $\beta_i(x)$ sont des fonctions non linéaires.

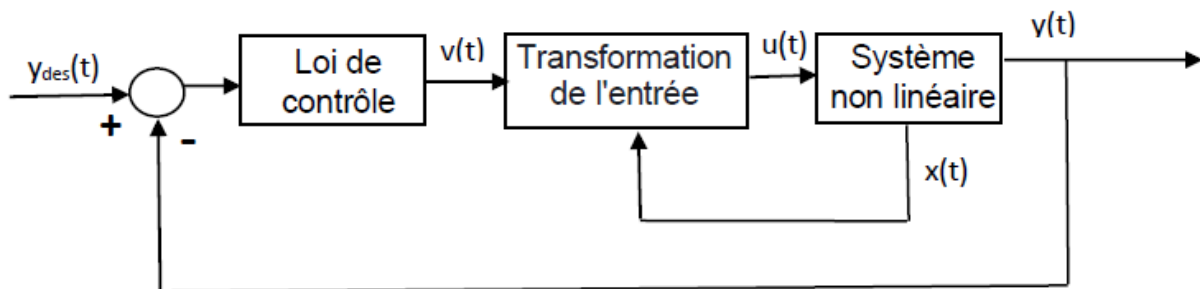


Figure 2 : Schéma fonctionnel de la linéarisation à rétroaction partielle

L'équation (10) aide à créer une relation linéaire entre les sorties y_i et les nouvelles entrées v_i en découplant l'interaction entre les entrées et sorties originales. Suite à ce découplage, les algorithmes de commande de chaque sous-système avec entrée et sortie indépendantes l'une de l'autre peuvent être synthétisés en utilisant les lois de commande linéaire conventionnelles. Pour ce faire, chaque sortie est différenciée de façon répétée jusqu'à ce que les signaux d'entrée apparaissent dans l'expression de dérivation. Les dérivées individuelles des sorties sont calculées à l'aide de dérivées de Lie qui sont marquées $L_f h$ et $L_g h$. La première dérivée a la forme

$$\dot{y}_j = L_f h_j(x) + \sum_{i=1}^m L_{g_i} h_j(x) u_i \quad (11)$$

où,

$$L_f h_j(x) = \frac{\partial h_j}{\partial x} f(x), \quad L_{g_i} h_j(x) = \frac{\partial h_j}{\partial x} g_i(x)$$

Si l'expression $L_{g_i} h_j(x) = 0$ pour tous les i , cela signifie que les entrées ne sont pas apparues dans la dérivation et qu'il faut donc continuer le processus de différenciation jusqu'à ce qu'au moins une entrée apparaisse dans la dérivation. La dérivation résultante prend la forme :

$$y_j^{r_j} = L_f^{r_j} h_j(x) + \sum_{i=1}^m L_{g_i} L_f^{r_j-1} h_j(x) u_i \quad (12)$$

Cette approche est suivie pour chaque sortie y_j . Les m équations résultantes peuvent être écrites sous la forme

$$\begin{bmatrix} y_1^{r_1} \\ \dots \\ y_m^{r_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \dots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix} + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

où, $E(x)$ est une matrice de forme $m \times m$

$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1 & \dots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m & \dots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m \end{bmatrix}$$

Si la matrice $E(x)$ est régulière, il est alors possible de définir la transformation d'entrée dans la forme

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = -E^{-1}(x) \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix} + E^{-1}(x) \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

Une fois la transformation d'entrée achevée comme indiqué en (14), la loi de commande linéaire est utilisée pour proposer une commande de rétroaction pour le système linéaire afin d'assurer le comportement souhaité du système non linéaire en utilisant les techniques classiques. L'ordre relatif (r_i) du système est ensuite utilisé pour calculer l'ordre global du système (r) pour analyser le concept de dynamique interne.

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_m \quad (15)$$

Le concept de dynamique interne sera étudié dans les travaux futurs.

4 Mise en oeuvre de la linéarisation à rétroaction partielle pour un modèle RPC

Le modèle dynamique (8) du RPC peut être représenté comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\underline{X}} &= F + Gu \\ \underline{y} &= h(\underline{X}) \end{aligned} \quad (16)$$

où,

$$\underline{X} = \begin{Bmatrix} X \\ \dot{X} \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ -M^{-1}N \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}J^T \end{Bmatrix}$$

avec contraintes,

$$0 \leq u \leq u_{max}$$

Le vecteur d'entrée u du système est donné par les forces dans les quatre câbles (u_1, u_2, u_3, u_4) tandis que la sortie du système (\underline{y}) est la position de la plate-forme (x, y, z) et l'un des angles, à savoir $gamma$ (γ), qui est l'angle d'orientation autour de l'axe-z.

La théorie de la section (4) est mise en œuvre ici et l'équation de découplage des entrées-sorties est de la forme :

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = -E^{-1}(x) \begin{bmatrix} L_f^2 h_1(X) \\ L_f^2 h_2(X) \\ L_f^2 h_3(X) \\ L_f^2 h_4(X) \end{bmatrix} + E^{-1}(x) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

où,

$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^1 h_1 & L_{g_2} L_f^1 h_1 & L_{g_3} L_f^1 h_1 & L_{g_4} L_f^1 h_1 \\ L_{g_1} L_f^1 h_2 & L_{g_2} L_f^1 h_2 & L_{g_3} L_f^1 h_2 & L_{g_4} L_f^1 h_2 \\ L_{g_1} L_f^1 h_3 & L_{g_2} L_f^1 h_3 & L_{g_3} L_f^1 h_3 & L_{g_4} L_f^1 h_3 \\ L_{g_1} L_f^1 h_4 & L_{g_2} L_f^1 h_4 & L_{g_3} L_f^1 h_4 & L_{g_4} L_f^1 h_4 \end{bmatrix}$$

Il est évident d'après (17) que la sortie (\underline{y}_i) est reliée aux nouvelles entrées v_i par une relation linéaire comme le montre (18).

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_1^2 \\ \underline{y}_2^2 \\ \underline{y}_3^2 \\ \underline{y}_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

où,

$$r_1=r_2=r_3=r_4=2$$

L'ordre relatif global du système est calculé comme étant 8 alors que l'état total du système est 12 indiquant la présence d'une dynamique interne dans le système. Si y^{des} est la valeur désirée de la trajectoire pour les sorties contrôlées, alors la valeur de la nouvelle entrée v_i est donnée comme indiqué:

$$v_i = \ddot{y}_i^{des} + k_d (\dot{y}_i^{des} - \dot{\underline{y}}_i) + k_p (y_i^{des} - \underline{y}_i) \quad (19)$$

où, k_d et k_p sont des matrices diagonales $m \times m$ de gains positifs.

La valeur des gains utilisés dans cette étude est donnée par méthode de placement des pôles. Un système de deuxième ordre avec un rapport d'amortissement de 1 (amorti de façon critique) est considéré dans ce cas pour la simulation dans laquelle les pôles des systèmes coïncident. Les pôles sont placés de telle sorte qu'ils se trouvent dans la moitié gauche du plan négatif. Les mêmes pôles ($k_{poles} = -10$) ont été utilisés dans la simulation pour toutes les sorties.

5 Simulation de la loi de contrôle

La section suivante présente les résultats de la simulation effectuée pour valider la loi de contrôle. Tel que présenté à la section 4, le contrôleur de rétroaction linéaire a été conçu avec la technique de placement des pôles. Le RPC a été simulé à l'intérieur d'une salle de dimension 5m*5m*3m avec une plate-forme mobile de taille 0.5m*0.5m et une charge utile totale de 30kg. Les contraintes sur l'angle d'inclinaison de la plate-forme mobile autour des axes x et y sont $\pm 30^\circ$. Les tensions maximales et minimales autorisées dans les câbles étaient de 500N et 1N respectivement. Pour calculer le tenseur d'inertie, on a considéré que le centre de masse (CoM) de la plate-forme mobile se trouvait à une hauteur de 0,2 m sous les points de fixation du câble, tandis que le CoM de la charge utile était considéré à une hauteur de 0,4 m sous le CoM de la plate-forme.

Le point de départ initial de l'effecteur final a été fixé à $x=1$, $y=1$, $z=1$ avec les valeurs correspondantes de α , β , γ calculées à partir du programme d'équilibre statique développé par les

auteurs dans [15]. Afin de vérifier et de valider la loi de contrôle, le point final de l'effecteur final a été sélectionné à $x=2$, $y=2$, $z=1.5$ avec les valeurs correspondantes de α , β , γ . Un polynôme d'ordre 5 a été utilisé pour générer les valeurs souhaitées de x , y , z et γ afin de garantir une trajectoire lisse. Le temps nécessaire pour atteindre le point final à partir du point de départ initial a été fixé à 10 secondes. La performance du contrôleur après avoir atteint le point final est également analysée pour vérifier s'il peut maintenir la position et l'orientation sans aucune autre action.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous. Les forces générées par le câble pour suivre la trajectoire désirée sont indiquées sur la fig. (3). On voit que les valeurs des forces sont positives et dans les limites définies précédemment. Les valeurs de la position de la plate-forme mobile sont indiquées dans la fig. (4). La variation d'orientation est représentée sur la fig. (5). La variation des valeurs des 2 paramètres qui ne sont pas contrôlés par la loi de contrôle, à savoir α et β , est également représentée sur la figure (5). On voit que les valeurs de l'angle d'orientation se situent également dans les limites définies précédemment, ce qui valide l'application de la loi de contrôle pour le RPC.

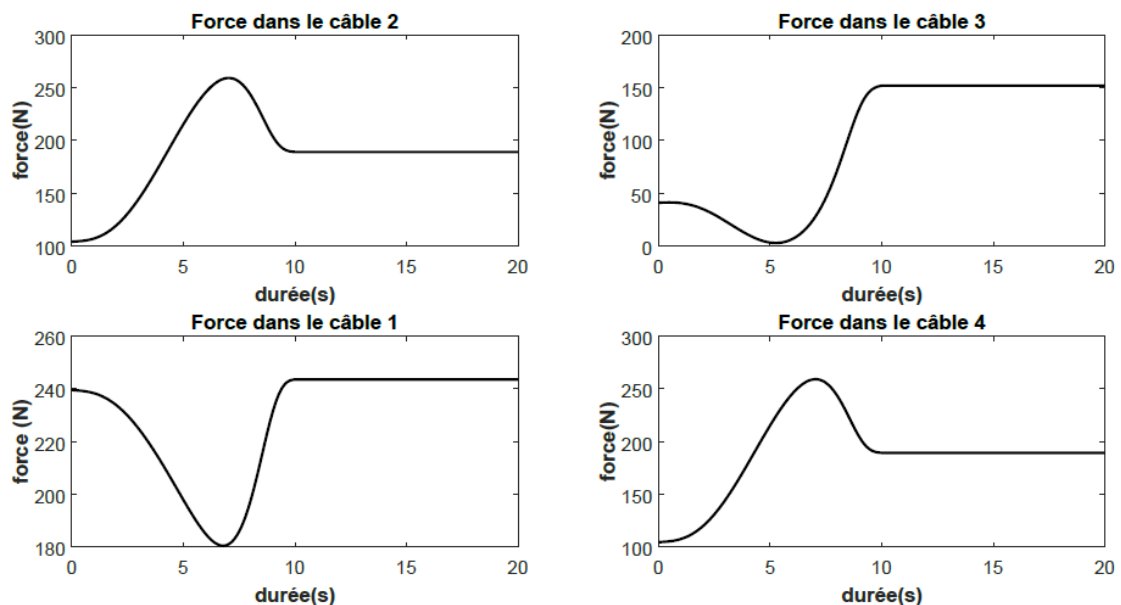


Figure 3: Variation des forces du câble

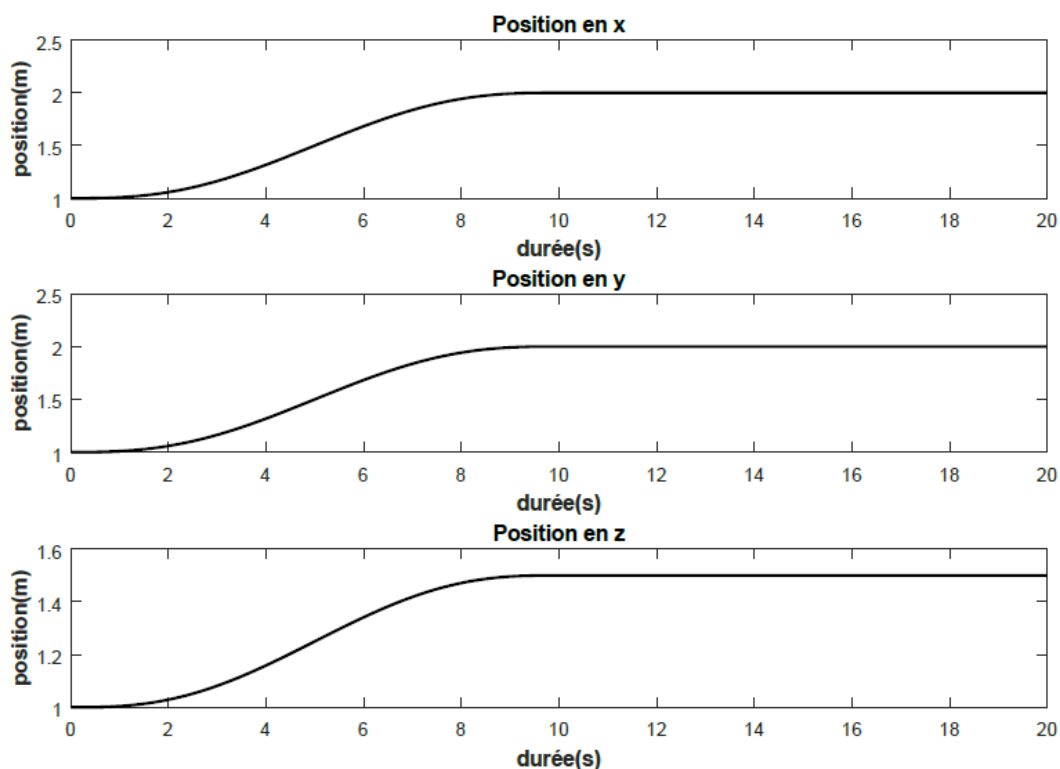


Figure 4: Changement de position de l'effecteur final

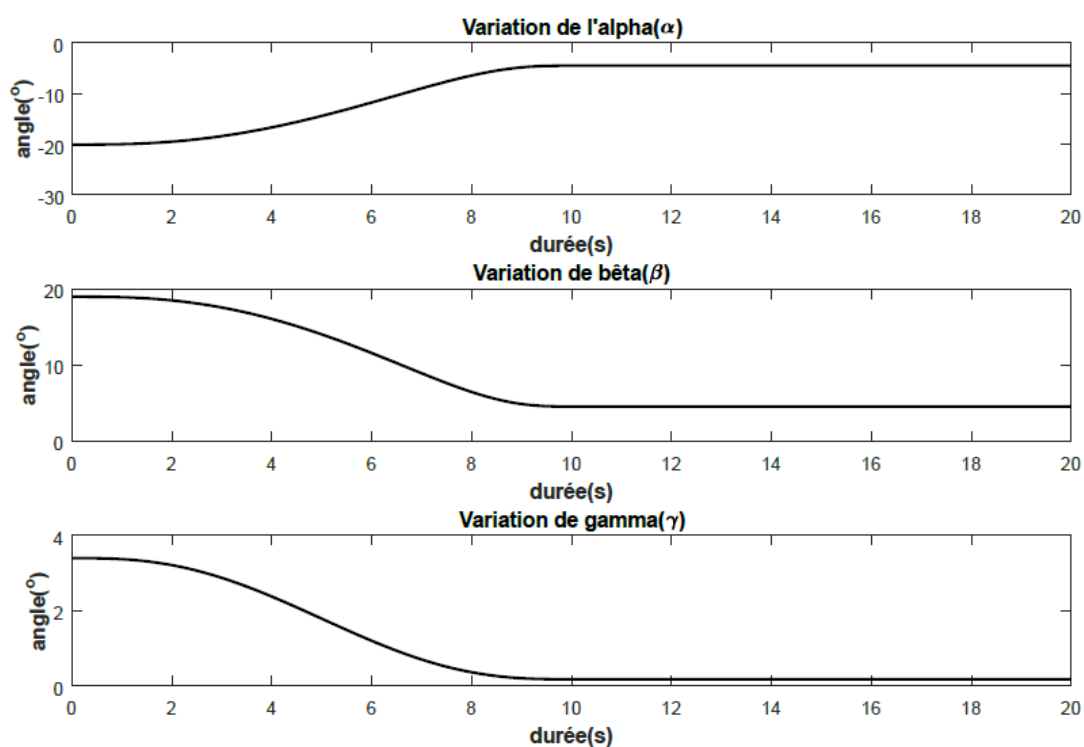


Figure 5: Changement d'orientation de l'effecteur final

Ensuite, l'évolution des valeurs d'accélération et de vitesse des grandeurs régulées est représentée sur les fig. (6, 7). Les figures montrent que le changement se situe dans la fourchette qui peut être

appliquée dans la pratique. Enfin, le changement de longueur des câbles pour obtenir la trajectoire désirée est illustré à la fig. (8).

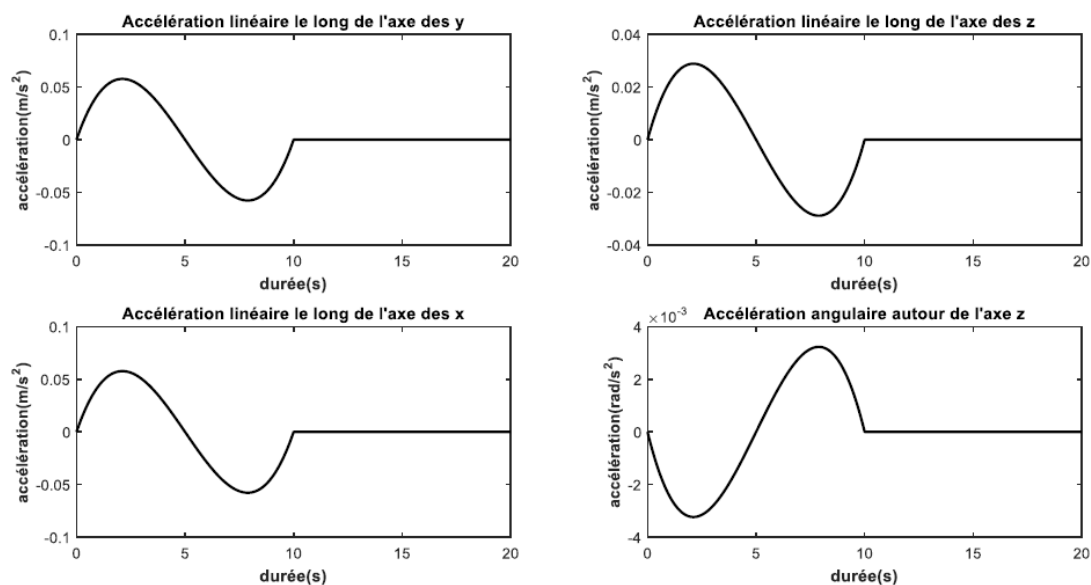


Figure 6: Valeurs d'accélération des variables de contrôle

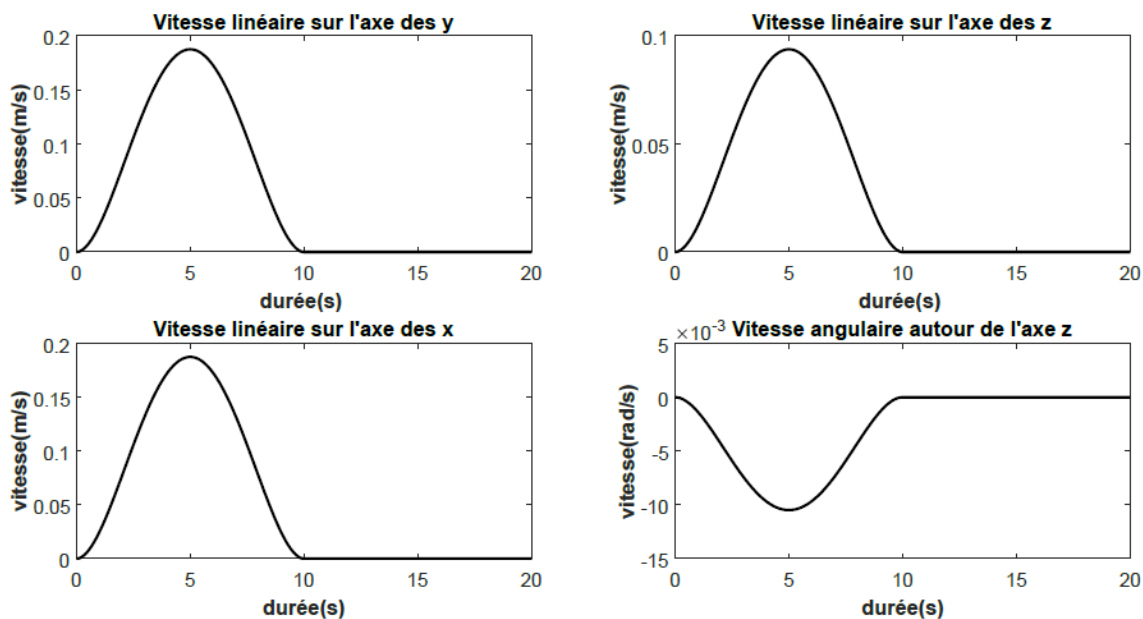


Figure 7: Les valeurs de vitesse des variables de contrôle

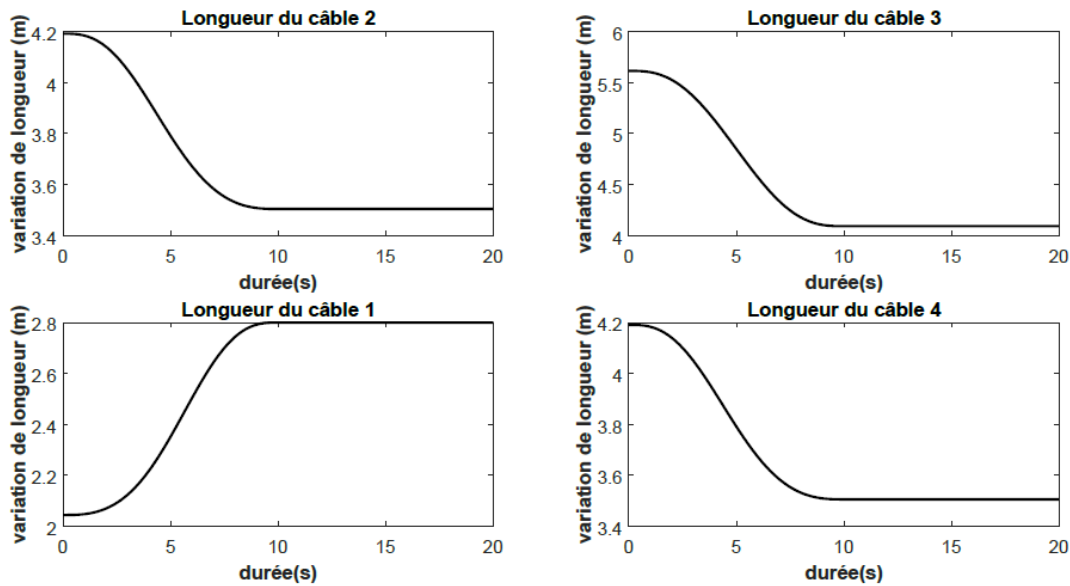


Figure 8: Modification de la longueur des câbles

6 CONCLUSION

Ce travail démontre la mise en œuvre de la méthode de linéarisation par rétroaction partielle pour contrôler un RPC sous-contraint. Les résultats montrent que la loi de contrôle fonctionne de manière satisfaisante et peut être appliquée pour le contrôle du RPC. Toutefois, il est possible d'améliorer encore ce travail en analysant la dynamique zéro du RPC. L'analyse du comportement de la loi de contrôle en des points plus proches de la région de singularité, le suivi des différentes trajectoires par des sorties individuelles variables et l'analyse de la robustesse de la loi de contrôle seront effectués dans la suite des travaux. La validation de la loi de contrôle sur le prototype nous aidera à vérifier la loi et donc à l'améliorer.

Références

- [1] Merlet, J., Daney, D., (2010). A portable, modular parallel wire crane for rescue operations, In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, pp. 2834–2839.
- [2] Gosselin, C., (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1).
- [3] Ming, A., (1994). Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires (Part I)-Concept, Design and Control. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 28(2), pp. 131–138.
- [4] Verhoeven, R., (2004). *Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms*. (Doctoral dissertation, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik)
- [5] Idá, E., Berti, A., Bruckmann, T., Carricato, M., (2018). Rest-to-Rest Trajectory Planning for Planar Underactuated Cable-Driven Parallel Robots, In: *Cable-Driven Parallel Robots*. Springer International Publishing, Cham, pp. 207–218.
- [6] Alp, A.B., Agrawal, S.K., (2002). Cable suspended robots: Feedback controllers with positive inputs, In: *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, IEEE, pp. 815–820.

- [7] Oh, S.-R., Agrawal, S.K., (2006). Generation of feasible set points and control of a cable robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(3), pp. 551–558.
- [8] Zi, B., Duan, B.Y., Du, J.L., Bao, H., (2008). Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. *Mechatronics*, 18(1), pp. 1–12.
- [9] Gosselin, C., Ren, P., Foucault, S., (2012). Dynamic trajectory planning of a two-DOF cable-suspended parallel robot, In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, pp. 1476–1481.
- [10] Park, J., Kwon, O., Park, J.H., (2013). Anti-sway trajectory generation of incompletely restrained wire-suspended system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(10), pp. 3171–3176.
- [11] Hwang, S.W., Bak, J.-H., Yoon, J., Park, J.H., Park, J.-O., (2016). Trajectory generation to suppress oscillations in under-constrained cable-driven parallel robots. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(12), pp. 5689–5697.
- [12] Maier, T., Woernle, C., (1999). *Flatness-based control of underconstrained cable suspension manipulators*.
- [13] Tall, I.A., (2016). Feedback and Partial Feedback Linearization of Nonlinear Systems: A Tribute to the Elders, In: *Nonlinear Systems - Design, Analysis, Estimation and Control*. InTech.
- [14] Tuan, L.A., Lee, S.-G., (2016). Nonlinear Feedback Control of Underactuated Mechanical Systems, In: *Nonlinear Systems - Design, Analysis, Estimation and Control*. InTech.
- [15] Kumar, A.A., Antoine, J.-F., Zattarin, P., Abba, G., (2019). Workspace Analysis of a 4 Cable-Driven Spatial Parallel Robot, In: *ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control*. Springer International Publishing, Cham, pp. 204–212.
- [16] Begey, J., Cuvillon, L., Lesellier, M., Gouttefarde, M., Gangloff, J., (2019). Dynamic Control of Parallel Robots Driven by Flexible Cables and Actuated by Position-Controlled Winches. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(1), pp. 286–293.
- [17] Isidori, A., (2013). *Nonlinear control systems*, Third edition, Communications and control engineering. Springer, London.