

Commande référencée vision d'une plateforme de Gough-Stewart par observation des éléments cinématiques

Vision-based control of a Gough-Stewart parallel mechanism using legs observation

Tej Dallej

Nicolas Andreff

Philippe Martinet

LASMEA -CNRS - Université Blaise Pascal/IFMA

LASMEA -CNRS - Université Blaise Pascal/IFMA, 63175 Aubière, France

Email : {Tej.Dallej}@lasmea.univ-bpclermont.fr

<http://www.lasmea.univ-bpclermont.fr/Control>

Résumé

Cet article présente une nouvelle approche de la commande référencée vision des mécanismes parallèles. Elle est basée sur le concept de redondance métrologique qui simplifie leurs modèles géométriques en utilisant des capteurs proprioceptifs additionnels. En observant les jambes du mécanisme, la vision fournit, dans un repère cartésien, une mesure extéroceptive de l'état interne du mécanisme. Formellement, il s'agit d'exprimer, par un concept original, la commande cinématique référencée vision des mécanismes parallèles. La commande utilise la mesure visuelle de la direction des jambes, plutôt qu'une mire placée sur l'organe terminal. La méthode est illustrée et validée par une simulation de la plateforme de Gough-Stewart.

Mots Clef

Mécanismes parallèles, plateforme de Gough, vision par ordinateur, commande, robotique.

Abstract

This paper presents a novel approach for vision-based control of the end-effector of parallel mechanisms. It is based on the metrological redundancy paradigm, which simplifies their kinematic models by introducing additional proprioceptive sensors. By observing the mechanism legs, vision replaces advantageously these sensors by delivering, in a Cartesian frame, an exteroceptive measurement of the internal state of the mechanism. Formally, the latter is expressed by an original concept of vision-based kinematics for parallel mechanisms. Based on it, control is derived that visually servoed the direction of the legs, rather than the end-effector pose. The method is illustrated and validated on a Gough-Stewart platform simulation.

Keywords

Parallel mechanisms, Gough platform, computer vision, control, robotic.

1 Introduction

Par opposition aux mécanismes sériels, un robot parallèle peut être défini comme un mécanisme en chaîne cinématique fermée dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes. Par conséquent, il peut montrer une meilleure répétabilité [23] qu'un mécanisme sériel. Néanmoins, la précision n'est pas forcément meilleure [29], en raison du grand nombre de liens et de liaisons passives. Il peut y avoir deux manières pour compenser cette faible précision. La première manière consiste à faire l'étalonnage géométrique du mécanisme. La deuxième repose sur l'emploi d'une loi de commande robuste aux erreurs d'étalonnage. Plusieurs travaux évoquent la commande des mécanismes parallèles (voir [1] pour une longue liste de références).

La commande cartésienne est naturellement basée sur l'utilisation de la jacobienne inverse qui transforme des vitesses cartésiennes en vitesses articulaires. Il faut remarquer que la Jacobienne inverse des mécanismes parallèles dépend non seulement de la configuration articulaire (comme pour le cas des mécanismes sériels) mais également de la pose de l'organe terminal.

En conséquence, cela nécessite d'estimer ou de mesurer la position de l'effecteur. La majorité des travaux s'intéressent à l'évaluation de la pose de l'organe terminal par le modèle géométrique direct et les mesures articulaires. Cependant, cette approche présente beaucoup de défauts, liés au fait qu'il n'y a habituellement aucune formulation analytique du modèle géométrique direct d'un mécanisme parallèle. Par conséquent, on inverse

numériquement le modèle cinématique inverse, qui est analytiquement défini pour la plupart des mécanismes parallèles.

Cependant, on sait que [22, 13] cette inversion numérique exige la détermination d'un polynôme ayant plusieurs solutions possibles (jusqu'à 24 solutions réelles pour une plateforme de Gough-Stewart). Une grande partie des travaux est ainsi consacrée à la résolution de ce problème avec précision et en temps réel (par exemple [30]), ou à la conception de mécanismes parallèles ayant un modèle géométrique direct analytique [15, 10].

Une solution alternative consiste à étudier l'apport de la redondance métrologique [4] qui simplifie les modèles géométriques en utilisant des capteurs additionnels dans le mécanisme et en permettant ainsi une commande plus facile [20].

La vision par ordinateur étant un moyen efficace pour estimer la pose de l'organe terminal [8, 16], c'est une bonne alternative pour la commande cartésienne des mécanismes parallèles. Elle peut se faire par trois manières.

1.1 Capteurs de vision

La première façon consiste à calculer les poses de l'organe terminal par vision. Puis, on les traduit dans des configurations articulaires en utilisant le modèle géométrique inverse. Finalement, on réalise l'asservissement dans l'espace articulaire. Il est relativement facile de mettre en application cette approche pour les mécanismes sériels à condition d'inverser proprement le modèle géométrique direct. Cela est plus facile pour les mécanismes parallèles puisque l'on dispose habituellement d'un modèle géométrique inverse analytique. La vision peut-être considérée comme un outil de mesure sans contact redondant, comme déjà indiqué dans le contexte de l'étalonnage des mécanismes parallèles [3] en employant des modèles simplifiés du fait de la redondance. Cependant, de telles approches devraient être employés avec précautions pour les mécanismes parallèles, étant donné que la commande articulaire ne gère pas les forces internes [7] du mécanisme.

1.2 Asservissement visuel

La vision peut être directement employée pour des tâches d'asservissement visuel [9]. En effet, au lieu de mesurer la pose de l'organe terminal et la convertir en pose articulaire, on pourrait penser à employer cette mesure directement pour la commande. Nous rappelons qu'il existe beaucoup de techniques d'asservissement visuel s'étendant du *Position-Based Visual Servoing* (PBVS) [21] (quand la mesure de pose est explicite) à l' *Image-Based Visual Servoing* (IBVS) [9] (quand on utilise seulement les mesures dans l'image). La plupart des applications consiste à placer le système de vision sur l'élément mobile et observer une scène fixe. Cependant, on peut également trouver des applications avec une caméra fixe observant l'effecteur [12]. Le lecteur trouvera un état de l'art recent dans [6]. Les techniques d'asservissement visuel sont très efficaces puisqu'il s'agit d'une boucle de commande fermée par un retour de

l'information directe ou indirecte sur l'état (pose) du robot dans son environnement. Cela apporte de la robustesse aux perturbations et aux erreurs d'étalonnage. Ainsi, nous recommandons fortement de les employer également pour la commande des mécanismes parallèles. Essentiellement, ces techniques produisent une vitesse cartésienne désirée qui est convertie en commande articulaire à travers la Jacobienne inverse. Par conséquent, on peut adopter de telles techniques pour les mécanismes parallèles. Il est même un peu plus facile que dans le cas sériel, puisque la Jacobienne inverse d'un mécanisme parallèle est habituellement analytique. La seule difficulté vient de sa dépendance de la pose cartésienne, qui doit être estimée, mais, comme cité ci-dessus, la vision peut également faire cela ! Notez que ce point plaide en faveur de l'approche PBVS.

1.3 Une nouvelle approche

Cependant, les deux méthodes précédentes consistent seulement à élaborer une commande classique qui, bien que probablement très efficace, n'est pas très innovatrice. Par conséquent, nous proposons une troisième voie utilisant la vision, qui présente les avantages de la redondance métrologique et de l'asservissement visuel, tout en évitant leurs inconvénients. En effet, ajouter des capteurs proprioceptifs n'est pas toujours réalisable en pratique et nécessite toujours que les capteurs soient prévus dès l'étape de la conception. Il y a alors des paramètres d'étalonnage additionnels dans le modèle géométrique et on doit les estimer afin de convertir les mesures des articulations redondantes en vecteur unitaire exprimé dans le repère de référence approprié. Par ailleurs, observer l'organe terminal d'un mécanisme parallèle par vision peut être difficile en pratique (i.e. observation de l'effecteur d'une machine-outil). Par contre, il est possible d'observer les jambes du mécanisme, même dans de tels cas extrêmes. De ce fait, la vision devient un capteur extéroceptif capable d'estimer des grandeurs proprioceptives. Cela nous ramène à nouveau au concept de redondance métrologique. En conséquence, la contribution de cet article est de présenter une commande référencée vision originale des mécanismes parallèles en observant leurs jambes avec une caméra fixée dans le repère de base. Elle est introduite dans le cas des mécanismes parallèles du type hexapode, avec l'illustration sur une plateforme de Gough-Stewart [11, 27] (Figure 1). Le plan de l'article est le suivant. La section 2 est consacrée à la modélisation cinématique référencée vision de l'hexapode et le modèle d'observation des jambes. La section 3 présente la géométrie différentielle de l'observation des jambes et comment la commande est élaborée. Pour finir, des résultats de simulation et la conclusion sont donnés respectivement dans les sections 4 et 5.



FIG. 1 – Observation de la plateforme de Gough par une caméra à courte focale.

2 Modèle cinématique référencé vision

2.1 Préliminaires

Les mécanismes parallèles sont, souvent, conçus avec des jambes fines et rectilignes. Ainsi, on pourra les considérer comme des lignes droites pour une analyse cinématique [23] ou pour l'étalonnage [26]. Par conséquent, nous avons besoin d'une représentation des droites pour la commande. Parmi les travaux sur l'asservissement visuel en utilisant des droites [9, 2, 17, 18, 14], nous préférions la représentation *des coordonnées de Plücker bi-normées* présentée dans [2], ce qui s'avère être cohérent avec la modélisation cinématique des mécanismes parallèles. Dans une telle représentation, une ligne droite dans l'espace 3D orienté [28] est modélisée par le triplet $(\underline{\mathbf{u}}, \underline{\mathbf{h}}, h)$ où :

- $\underline{\mathbf{u}}$ est un vecteur unitaire, donnant l'orientation de la droite .
- $\underline{\mathbf{h}}$ est encore un vecteur unitaire et h est un scalaire positif. Ils sont définis par $h\underline{\mathbf{h}} = \mathbf{P} \times \underline{\mathbf{u}}$ où \mathbf{P} est un point quelconque de la droite.

Notons qu'en utilisant cette notation, les coordonnées de Plücker normées [24, 25] sont le couple $(\underline{\mathbf{u}}, h\underline{\mathbf{h}})$. La propriété intéressante de cette représentation, concernant la vision par ordinateur, est que $\underline{\mathbf{h}} = (h_x, h_y, h_z)^T$ représente la projection de la droite sur le plan image, *i.e.* l'équation d'une droite vérifiant

$$h_x x + h_y y + h_z = 0 \quad (1)$$

où x et y sont les coordonnées d'un point dans l'image. L'interprétation du scalaire h est la plus courte distance entre la droite et le centre de projection.

2.2 Modélisation cinématique de la plate-forme

Concidérons le mécanisme de la figure 1. Il possède 6 jambes de longueur variable $q_i, i \in 1..6$, liées à la base par des articulations sphériques définies par les points \mathbf{A}_i et à l'organe terminal(l'effecteur) par des liaisons sphériques définies par les points \mathbf{B}_i . Le modèle géométrique inverse

d'une telle plateforme est donné par :

$$\forall i \in 1..6, \quad q_i^2 = \overrightarrow{\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i}^T \overrightarrow{\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i} \quad (2)$$

Ce qui donne le module q_i du vecteur $\overrightarrow{\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i}$. Ce modèle peut être exprimé dans n'importe quel repère euclidien de référence. Par conséquent, il peut être exprimé dans le repère de base \mathcal{R}_b , dans le repère lié à l'organe terminal \mathcal{R}_e ou dans le repère caméra \mathcal{R}_c . Par la suite le repère utilisé sera rendu explicite par un exposant à gauche. Considérons par exemple $(\underline{\mathbf{u}}_i, \underline{\mathbf{h}}_i, h_i)$, les coordonnées de Plücker bi-normées de la droite passant par \mathbf{A}_i et \mathbf{B}_i , orientée de \mathbf{A}_i vers \mathbf{B}_i . Nous avons trivialement

$$\overrightarrow{\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i} = q_i \underline{\mathbf{u}}_i \quad (3)$$

Dans [23], la jacobienne inverse de la plateforme reliant le torseur cinématique de l'effecteur $\tau_e = \begin{pmatrix} V_e \\ \Omega_e \end{pmatrix}$ et la vitesse articulaire est

$$\mathbf{J}_e^{inv} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{u}}_1^T (\overrightarrow{\mathbf{C} \mathbf{B}_1} \times \underline{\mathbf{u}}_1)^T \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{u}}_6^T (\overrightarrow{\mathbf{C} \mathbf{B}_6} \times \underline{\mathbf{u}}_6)^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

où \mathbf{C} est le centre du repère lié à l'effecteur. On note la matrice jacobienne inverse par \mathbf{J}_e^{inv} au lieu de \mathbf{J}^{-1} pour montrer qu'elle a une expression analytique à l'inverse de celle des mécanismes sériels.

2.3 Modèle cinématique référencé vision de la plateforme

Il a été noté [23] que les lignes de la Jacobienne inverse sont les coordonnées de Plücker des jambes. Cependant, ceci est seulement vrai si le repère de référence où ces coordonnées sont exprimées est centré en \mathbf{C} . Dans ce cas, $\overrightarrow{\mathbf{C} \mathbf{B}_i}, i = 1..6$ sont constants et \mathbf{J}_e^{inv} dépend seulement de $\underline{\mathbf{u}}_i, i = 1..6$. En conséquence, si on peut mesurer ou estimer $\underline{\mathbf{u}}_i, i = 1..6$ dans le repère lié à l'effecteur, on peut facilement convertir ${}^e\tau_e$, la vitesse cartésienne exprimée dans le repère de l'effecteur en une vitesse articulaire. Cette mesure peut être faite avec une caméra embarquée sur l'effecteur (c-à-d. $\mathcal{R}_c = \mathcal{R}_e$) et observant les jambes (voir 2.4). Dans ce cas, le modèle géométrique référencé vision de l'hexapode exprimé dans le repère lié à l'effecteur est très simple :

$$q_i {}^e \underline{\mathbf{u}}_i = {}^e \mathbf{B}_i - {}^e \mathbf{R}_b {}^b \mathbf{A}_i - {}^e \mathbf{t}_b \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^e \mathbf{J}_e^{inv} {}^e \tau_e \quad (6)$$

$$\text{avec} \quad {}^e \mathbf{J}_e^{inv} = \begin{bmatrix} {}^e \underline{\mathbf{u}}_1^T {}^e h_1 {}^e \underline{\mathbf{h}}_1^T \\ \vdots \\ {}^e \underline{\mathbf{u}}_6^T {}^e h_6 {}^e \underline{\mathbf{h}}_6^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^e h_i {}^e \underline{\mathbf{h}}_i = {}^e \mathbf{B}_i \times {}^e \underline{\mathbf{u}}_i, i = 1..6. \quad (8)$$

Cette formulation peut s'appliquer à un asservissement visuel classique avec une caméra embarquée. Dans la pratique, la caméra devrait observer la cible externe et toutes les jambes en même temps. Alternativement, plusieurs

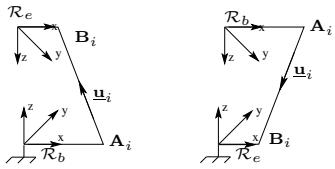


FIG. 2 – Dualité entre les deux modes : effecteur mobile et effecteur fixe.

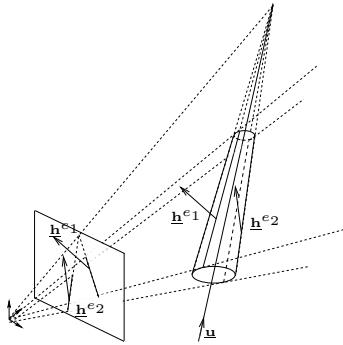


FIG. 3 – Projection d'un cylindre sur l'image.

caméras pourraient être utilisées, mais elles devraient être synchronisées et étalonnées l'une par rapport à l'autre. Dans la pratique, il est plus facile de considérer que la caméra observant les jambes est fixée à la base. Le repère de référence de la caméra devient le repère lié à la base, et la cinématique de l'hexapode n'est pas aussi simple que dans le cas d'une caméra embarquée. En effet, exprimée dans le repère de la base, (4) devient

$${}^b\mathbf{J}_b^{inv} = \begin{bmatrix} {}^b\mathbf{u}_1^T (\overrightarrow{{}^b\mathbf{C}^b\mathbf{B}_1} \times {}^b\mathbf{u}_1)^T \\ \vdots \\ {}^b\mathbf{u}_6^T (\overrightarrow{{}^b\mathbf{C}^b\mathbf{B}_6} \times {}^b\mathbf{u}_6)^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

où $\overrightarrow{{}^b\mathbf{C}^b\mathbf{B}_i} = {}^b\mathbf{R}_e {}^e\mathbf{B}_i \forall i = 1..6$. Par conséquent, il est nécessaire, en utilisant cette expression d'estimer l'orientation de l'effecteur par rapport au repère de la base. Une formulation alternative est possible. Elle est légèrement moins utile pour la commande cartésienne standard. Cependant, elle est bien adaptée à l'observation des jambes. Elle consiste à considérer le mécanisme dans son mode dual de fonctionnement : l'effecteur est fixe et la base en mouvement. Donc, nous devons nous intéresser à la Jacobienne inverse reliant la vitesse cartésienne de base ${}^b\tau_b = \begin{pmatrix} {}^bV_b \\ {}^b\Omega_b \end{pmatrix}$ à la vitesse articulaire exprimée dans le repère de la base. Par analogie avec (5-8), i.e. en permutant le rôle de \mathbf{B}_i et \mathbf{A}_i et de \mathcal{R}_e et \mathcal{R}_b (Figure 2), on obtient le modèle géométrique référencé vision de la plateforme

exprimé dans le repère de la base.

$$q_i {}^b\mathbf{u}_i = {}^b\mathbf{R}_e {}^e\mathbf{B}_i + {}^b\mathbf{t}_e - {}^b\mathbf{A}_i \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^b\mathbf{J}_b^{inv} {}^b\tau_b \quad (11)$$

$$\text{avec } {}^b\mathbf{J}_b^{inv} = - \begin{bmatrix} {}^b\mathbf{u}_1^T {}^b\mathbf{h}_1 {}^b\mathbf{h}_1^T \\ \vdots \\ {}^b\mathbf{u}_6^T {}^b\mathbf{h}_6 {}^b\mathbf{h}_6^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^b\mathbf{h}_i {}^b\mathbf{h}_i = {}^b\mathbf{A}_i \times {}^b\mathbf{u}_i, i = 1..6. \quad (13)$$

Notez les signes dans (10) et (12), venant du fait que, dans la permutation, l'orientation des jambes a changé. Notez également que maintenant la Jacobienne inverse est indépendante de la pose relative de l'effecteur et de la base.

2.4 Observation des limbes d'un cylindre

Comme on a vu ci-dessus, on doit estimer le vecteur principal \mathbf{u}_i de chaque jambe. Puisque le vecteur principal d'une jambe est essentiellement une primitive cartésienne, nous avons choisi de l'estimer par vision. En effet, la vision est un outil approprié pour la mesure cartésienne et le suivi, et selon [26], si la vision est également choisie pour l'étalonnage, cela ne rajoute pas de paramètre supplémentaire. Maintenant le problème est de récupérer \mathbf{u}_i à partir de l'observation de la jambe. Cela peut-être plus ou moins facile, bien que certainement faisable, dans le cas d'une forme arbitraire. Pour des raisons mécaniques telles que la rigidité, la plupart des mécanismes parallèles sont non seulement conçus avec des jambes fines et rectilignes, mais de plus avec des formes cylindriques. En conséquence, le vecteur principal \mathbf{u}_i de la jambe est également le vecteur principal des bords du cylindre. De ce fait, par simple géométrie projective, on montre que cette direction commune est le point de fuite des deux bords de cylindre dans l'image (Figure 3). Le bord d'un cylindre est une ligne droite. Il peut donc être représenté par ses coordonnées de Plücker binormées [19]. Notons \mathbf{h}^{e1} et \mathbf{h}^{e2} les projections sur l'image des deux bords d'un cylindre. Il est facile de prouver que le vecteur principal \mathbf{u} de l'axe du cylindre s'écrit

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{h}^{e1} \times \mathbf{h}^{e2}}{\|\mathbf{h}^{e1} \times \mathbf{h}^{e2}\|} \quad (14)$$

3 Control

Dans cette section, nous nous intéressons au problème de la commande : à partir d'une configuration donnée des jambes observées par une caméra attachée à la base, comment atteindre une configuration désirée ? L'asservissement visuel est basé sur la matrice d'interaction \mathbf{L}^T [5] reliant le mouvement relatif instantané $T_c = {}^c\tau_c - {}^c\tau_s$ entre la caméra et la scène, à la dérivée par rapport au temps du vecteur s de tous les primitives visuelles qui sont utilisées :

$$\dot{s} = \mathbf{L}_{(s)}^T T_c \quad (15)$$

où ${}^c\tau_c$ et ${}^c\tau_s$ sont respectivement le torseur cinématique de la caméra et de la scène, exprimés dans \mathcal{R}_c . Puis, on impose

une décroissance exponentielle de l'erreur $e(s, s_d)$ entre le vecteur de mesure courant s et le vecteur de mesure désiré s_d en utilisant un schéma de commande proportionnelle par linéarisation et découplage de la forme :

$$T_c = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_{(s)}^{T+} e(s, s_d) \quad (16)$$

où T_c est utilisé comme une pseudo variable de commande.

3.1 Primitives et erreurs visuelles

Comme prévu ci-dessus, nous employons les vecteurs unitaires $\underline{\mathbf{u}}_i, i = 1..6$ en tant que primitives visuelles. Puisque ces primitives sont exprimées dans l'espace 3D, nous sommes proches de l'approche PBVS. Cependant, puisque l'étape de reconstruction (14) est algébrique, nous sommes également proche de l'IBVS. Les primitives visuelles étant des vecteurs unitaires, il est théoriquement plus élégant d'employer l'erreur géodésique plutôt qu'une différence standard des vecteurs. En conséquence, l'erreur fondant la loi de commande proposée devient

$$\mathbf{e}_i = {}^b\underline{\mathbf{u}}_i \times {}^b\underline{\mathbf{u}}_{di} \quad (17)$$

3.2 Matrice d'interaction

La relation entre dérivée par rapport au temps de $\underline{\mathbf{u}}_i$ et la commande peut-être établie. À partir de (3), nous obtenons immédiatement

$${}^b\dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = \frac{1}{q_i} \frac{d}{dt} {}^b\overrightarrow{\mathbf{A}_i} {}^b\overrightarrow{\mathbf{B}_i} - \frac{\dot{q}_i}{q_i} {}^b\underline{\mathbf{u}}_i \quad (18)$$

En insérant la matrice d'interaction associée à un point 3D [21]

$$\frac{d}{dt} {}^b\overrightarrow{\mathbf{A}_i} {}^b\overrightarrow{\mathbf{B}_i} = \left[-\mathbf{I}_3 \quad \widetilde{{}^b\mathbf{A}_i} \right] {}^b\tau_b \quad (19)$$

où $\widetilde{\cdot}$ est la matrice antisymétrique associée au signe du produit, dans (18), nous obtenons

$${}^b\dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = -\frac{1}{q_i} \left[\mathbf{I}_3 \quad -\widetilde{{}^b\mathbf{A}_i} \right] {}^b\tau_b - \frac{\dot{q}_i}{q_i} {}^b\underline{\mathbf{u}}_i \quad (20)$$

Il est intéressant de voir que la vitesse cartésienne et la vitesse articulaire apparaissent dans cette expression, tout en étant liées entre elles par la jacobienne inverse dans (12). C'est certainement dû à l'existence des chaînes cinématiques fermées. Néanmoins, en utilisant précisément cette Jacobienne inverse, on peut établir une relation entre chaque ${}^b\dot{\underline{\mathbf{u}}}_i$ et ${}^b\tau_b$ seulement. En effet, chaque ligne de la matrice Jacobienne dans (12) est telle que :

$$- \left[{}^b\underline{\mathbf{u}}_i^T \quad {}^b\mathbf{h}_1 {}^b\mathbf{h}_i^T \right] = - {}^b\underline{\mathbf{u}}_i^T \left[\mathbf{I}_3 \quad -\widetilde{{}^b\mathbf{A}_i} \right] \quad (21)$$

Par conséquent, nous obtenons la relation suivante

$${}^b\dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = \mathbf{M}_i^T {}^b\tau_b \quad (22)$$

$$\mathbf{M}_i^T = -\frac{1}{q_i} \left(\mathbf{I}_3 - {}^b\underline{\mathbf{u}}_i {}^b\underline{\mathbf{u}}_i^T \right) \left[\mathbf{I}_3 \quad -\widetilde{{}^b\mathbf{A}_i} \right] \quad (23)$$

où \mathbf{M}_i^T est de rang 2.

Condition nécessaire 1 Au minimum, 3 jambes indépendantes sont nécessaires pour commander la pose de l'effecteur, à condition qu'il existe un difféomorphisme entre l'espace des tâches et l'espace cartésien $SE(3)$.

Une pseudo matrice d'interaction \mathbf{M}^T est obtenue par l'empilement de $\mathbf{M}_i^T, i = 1..6$. En effet, en asservissement visuel, les primitives visuelles sont les projections sur le plan image des objets dans l'espace qui sont rigidement liés entre eux. Alors que, ici, chacune des jambes est en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Néanmoins, la commande peut être formulée comme le montre la section suivante.

3.3 La loi de commande

Choisissons une commande telle que $E = (\mathbf{e}_1^T, \dots, \mathbf{e}_6^T)^T$ suive une décroissance exponentielle, i.e. telle que

$$\dot{E} = -\lambda E \quad (24)$$

En introduisant $\mathbf{N}_i^T = -\widetilde{{}^b\mathbf{u}}_{di} \mathbf{M}_i^T$ et $\mathbf{N}^T = (\mathbf{N}_1, \dots, \mathbf{N}_6)^T$, la combinaison de (17), (22) et (24) donne

$$\mathbf{N}^T {}^b\tau_b = -\lambda E \quad (25)$$

La vitesse cartésienne générée par la commande est par conséquent

$${}^b\tau_b = -\lambda \hat{\mathbf{N}}^T {}^b\tau_b \quad (26)$$

et peut être transformée en une vitesse articulaire de commande en utilisant (11)

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda {}^b\mathbf{J}_b^{inv} \hat{\mathbf{N}}^T {}^b\tau_b \quad (27)$$

4 Resultats

4.1 Simulation du mécanisme parallèle

En raison des contraintes cinématiques, il n'est pas facile de simuler la commande d'un mécanisme parallèle. En effet, pour simuler la position de l'effecteur ${}^b\mathbf{T}_e$, à partir de toutes les informations qu'on peut obtenir sur le mécanisme, on a deux options : l'une intègre dans l'espace articulaire et résout le problème géométrique direct sur chaque période. L'autre intègre directement la vitesse du terminal en se référant à la base ${}^b\tau_e$ dans l'espace cartésien. La première option pose problème en raison du modèle géométrique direct non analytique. Ainsi, nous préférons la deuxième option qui exige d'être très prudent (particulièrement dans l'étape d'intégration), puisqu'on intègre dans un espace courbe au lieu d'un espace vectoriel. Une fois que l'étape d'intégration est validée la simulation est facile (Figure 4). En effet, de (7), on aura ${}^e\tau_e$ en connaissant la vitesse articulaire de la commande $\dot{\mathbf{q}}$. Soit

$${}^b\tau_e = \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{R}_e & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^b\mathbf{R}_e \end{pmatrix} {}^e\tau_e, \quad (28)$$

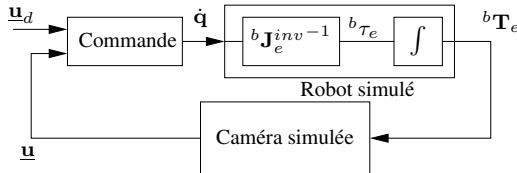


FIG. 4 – Schéma du simulateur

et soit ${}^b\mathbf{J}_e^{inv} = \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{R}_e & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^b\mathbf{R}_e \end{pmatrix} {}^e\mathbf{J}_e^{inv}$, On a finalement

$$b\tau_e = {}^b\mathbf{J}_e^{inv-1} \dot{\mathbf{q}} \quad (29)$$

qui est intégré comme ci-dessus. En conséquence, le modèle géométrique inverse référencé vision de l'hexapode *exprimé dans le repère de l'organe terminal* est utilisé pour la simulation, tandis que celui *exprimé dans le repère de la base* est utilisé pour la commande.

4.2 Simulation de la commande

Nous avons simulé une plateforme commerciale de Gough-Stewart (Deltalab), tel que ${}^b\mathbf{A}_{2k} = R_b \begin{pmatrix} \cos(k\frac{\pi}{3} + \alpha) \\ \sin(k\frac{\pi}{3} + \alpha) \\ 0 \end{pmatrix}$, ${}^b\mathbf{A}_{2k+1} = R_b \begin{pmatrix} \cos(k\frac{\pi}{3} - \alpha) \\ \sin(k\frac{\pi}{3} - \alpha) \\ 0 \end{pmatrix}$, ${}^e\mathbf{B}_{2k} = R_e \begin{pmatrix} \cos(k\frac{\pi}{3} + \beta) \\ \sin(k\frac{\pi}{3} + \beta) \\ 0 \end{pmatrix}$, ${}^e\mathbf{B}_{2k+1} = R_e \begin{pmatrix} \cos(k\frac{\pi}{3} - \beta) \\ \sin(k\frac{\pi}{3} - \beta) \\ 0 \end{pmatrix}$, $k \in \{0, 1, 2\}$ avec $R_b = 270mm$, $\alpha = 4.25^\circ$, $R_e = 195mm$, $\beta = 5.885^\circ$ et la course de la longueur des jambes est $[345mm, 485mm]$. Dans toutes les simulations présentées ici, la configuration initiale de la plateforme est la configuration de référence où toutes les jambes ont la longueur minimale. La configuration finale est obtenue à partir de cette configuration de référence par une translation de $10cm$ le long de l'axe de z de la plateforme (vers le haut verticale) et d'une rotation de 15° autour de l'axe de x . De ce fait nous atteignons la limite de la zone de travail.

Dans une première simulation, toutes les jambes sont utilisées pour la commande. La figure 5 montre que les erreurs sur chaque jambe convergent exponentiellement à 0. La figure 6 montre en plus que la pose désirée de l'organe terminal est atteinte.

Nous avons également ajouté un certain bruit à la simulation (Figure 7). Ainsi, puisqu'il est difficile de caractériser le bruit dans l'image, nous avons appliqué une rotation aléatoire du vecteur directeur unitaire \underline{u}_i avec l'amplitude maximale de 0.01 , 0.05 et 0.1° . Les résultats montrent une robustesse potentiellement bonne.

Dans une deuxième simulation, seulement les jambes 1, 5 et 6 ont été utilisées pour la commande, afin de prouver que 3 jambes peuvent être suffisantes pour atteindre la configuration désirée. La figure 8 montre que la convergence est assurée même si l'erreur sur les jambes 2, 3 et 4 n'est pas contrôlée. Dans une troisième simulation, seulement les jambes 2, 4 et 6 ont été utilisées. La figure 9 illustre la condition nécessaire 1 : les jambes commandées

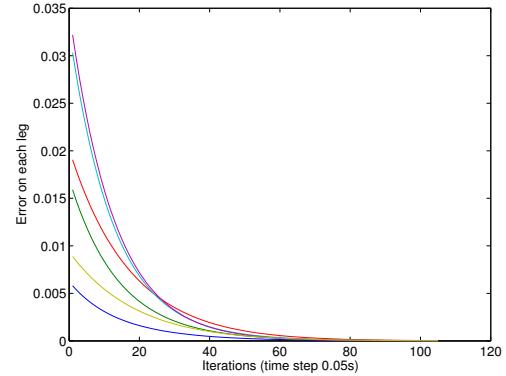


FIG. 5 – Erreurs pour chaque jambe $\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i$

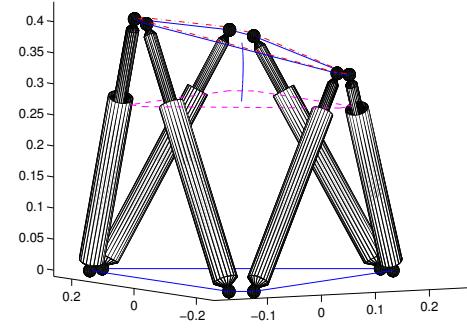


FIG. 6 – Trajectoire dans l'espace avec la position initiale (magenta, à tiret) et (rouge, tiret-pointillée) la position désirée de la plateforme

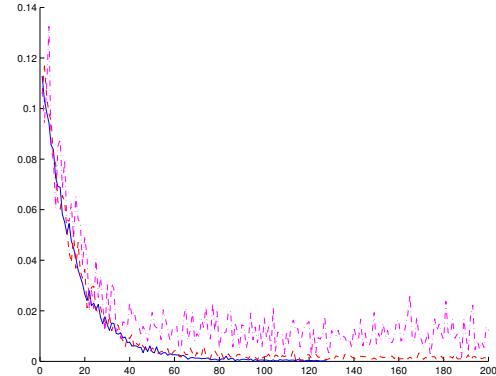


FIG. 7 – Robustesse au bruit : la somme des erreurs au carré $E^T E$ avec une amplitude du bruit de 0.01 degrés (tiret), 0.05 degrés (tiret) et 0.1 degrés (tiret-pointillée).

convergent vers leur orientation désirée, les jambes non-commandées et l'effecteur n'atteignent pas leurs positions désirées.

Dans la deuxième et la troisième simulation, la matrice d'interaction est de rang plein et n'engendre pas une commande dégénérée. Cependant, dans les deux cas, définissant l'orientation de 3 jambes, il n'est pas suffisant de déterminer uniquement la pose de l'effecteur. La deuxième simulation peut-être considérée comme un test heureux, qui peut être expliquée par le fait que le mouvement des 3 jambes commandées entre la position initiale et la configuration désirée amène les 3 autres jambes vers leur direction désirée.

5 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle méthode pour commander un mécanisme parallèle en utilisant la vision comme un capteur redondant et en ajoutant une nature propriocepitive à la nature extéroceptive habituelle de la vision. Elle a été validée et illustrée sur une simulation de plateforme de Gough-Stewart, montrant un domaine probablement grand de convergence et des propriétés potentiellement bonnes de robustesse.

Cependant, cet article est seulement le début d'un vaste domaine de recherche. En effet, il y a plusieurs points à envisager. La validation doit être faite sur une vraie plateforme. D'abord, cette commande ne tient pas compte des limites articulaires. Ce point est fondamental puisque ces limites peuvent être facilement atteintes et leur action peut ne pas être aussi insignifiante que pour les mécanismes sériels. En second lieu, cette commande suppose une détection des bords du cylindre qui est connue pour être sensible dans la vision. Troisièmement, puisque la commande est essentiellement basée sur la direction de chaque jambe, on peut penser à l'extraire à partir de l'image d'une jambe modèle. Quatrièmement, bien que la convergence semble potentiellement globale, on ne l'a pas prouvé, et même la robustesse et la contrôlabilité n'ont pas été complètement étudiées. Finalement, il serait intéressant d'appliquer cette commande à n'importe quel mécanisme parallèle.

Références

- [1] <http://www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet>.
- [2] N. Andreff, B. Espiau, and R. Horaud. Visual servoing from lines. *Int. Journal of Robotics Research*, 21(8) :679–700, August 2002.
- [3] N. Andreff, P. Renaud, P. Martinet, and F. Pierrot. Vision-based kinematic calibration of an H4 parallel mechanism : practical accuracies. *Industrial Robot : An international journal*, 31(3) :273–283, May 2004.
- [4] L. Baron and J. Angeles. The on-line direct kinematics of parallel manipulators under joint-sensor redundancy. In *Advances in Robot Kinematics*, pages 126–137, 1998.

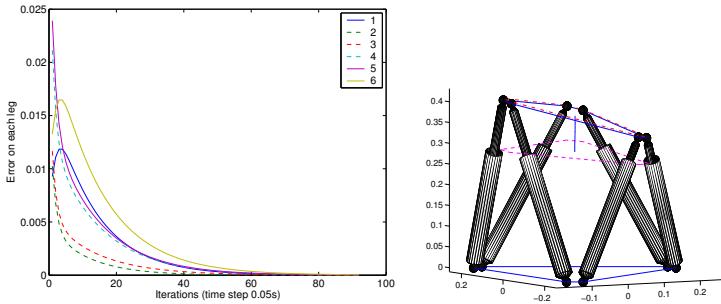


FIG. 8 – Convergence heureuse dans le cas où les jambes 1, 5 and 6 sont les seules utilisées pour la commande.

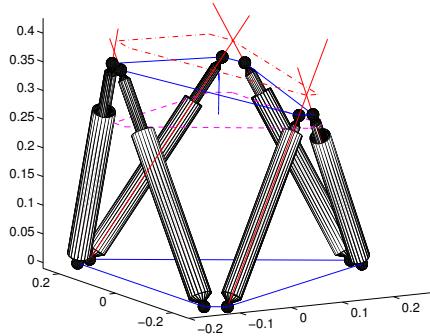


FIG. 9 – Divergence dans le cas où les jambes 2, 4 et 6 sont les seules utilisées pour la commande. La direction des jambes est superposée (rouge) aux cylindres. Une jambe a convergé à l'orientation désirée si sa direction croise l'effecteur dans la pose désirée à l'endroit de l'articulation. Notez que ceci se produit seulement pour les 3 jambes commandées.

- [5] F. Chaumette. *La commande des robots manipulateurs, Traité IC2*, chapter Asservissement visuel, pages 105–150. Hermès, 2002.
- [6] H.I. Christensen and P. Corke, editors. *Int. Journal of Robotics Research – Special Issue on Visual Servoing*, volume 22, October 2003.
- [7] B. Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya. Force redundancy in parallel manipulators : theoretical and practical issues. *Mech. Mach. Theory*, 33(6) :727–742, 1998.
- [8] D. DeMenthon and L. Davis. Model-based object pose in 25 lines of code. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 335–343, 1992.
- [9] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives. A New Approach To Visual Servoing in Robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3), June 1992.
- [10] G. Gogu. Fully-isotropic T3R1-type parallel manipulator. In J. Lenarčić and C. Galletti, editors, *On Advances in Robot Kinematics*, volume Kluwer Academic Publishers, pages 265–272. 2004.
- [11] V.E. Gough and S.G. Whitehall. Universal tyre test machine. In *Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress*, pages 117–137, May 1962.
- [12] R. Horaud, F. Dornaika, and B. Espiau. Visually Guided Object Grasping. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(4) :525–532, 1998.
- [13] M. Husty. An algorithm for solving the direct kinematics of general Gough-Stewart platforms. *Mech. Mach. Theory*, 31(4) :365–380, 1996.
- [14] D. Khadraoui, R. Rouveure, C. Debain, P. Martinet, P. Bonton, and J. Gallice. Vision based control in driving assistance of agricultural vehicles. *Int. Journal of Robotics Research*, 17(10), October 1998.
- [15] H.S. Kim and L.-W. Tsai. Evaluation of a Cartesian parallel manipulator. In J. Lenarčić and F. Thomas, editors, *Advances in Robot Kinematics : Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, June 2002.
- [16] JM. Lavest, M. Viala, and M. Dhome. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration. In *Proceedings of ECCV98*, pages 158–174, Freiburg, June 1998.
- [17] R. Mahony and T. Hamel. Visual servoing using linear features for under-actuated rigid-body dynamics. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots Systems*, Hawaii, USA, 2001.
- [18] E. Malis, J. Borrelly, and P. Rives. Intrinsics-free visual servoing with respect to straight lines. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots Systems*, Lausanne, CH, October 2002.
- [19] A. Marchadier. Commande cinématique référencée vision d'un robot parallèle de type plateforme de Gough. Master's thesis, Univ. B. Pascal, Clermont-Ferrand, 2004.
- [20] F. Marquet. *Contribution à l'étude de l'apport de la redondance en robotique parallèle*. PhD thesis, LIRMM - Univ. Montpellier II, October 2002.
- [21] P. Martinet, J. Gallice, and D. Khadraoui. Vision based control law using 3d visual features. In *Proc. World Automation Congress, WAC'96, Robotics and Manufacturing Systems*, volume 3, pages 497–502, May 1996.
- [22] J-P. Merlet. An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. Technical Report 1331, INRIA, November 1990.
- [23] J.P. Merlet. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [24] J. Plücker. On a new geometry of space. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155 :725–791, 1865.
- [25] H. Pottmann, M. Peternell, and B. Ravani. Approximation in line space – applications in robot kinematics and surface reconstruction. In J. Lenarčić and M. L. Husty, editors, *Advances in Robot Kinematics : Analysis and Control*, pages 403–412. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [26] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, and Ph. Martinet. On vision-based kinematic calibration of a Stewart-Gough platform. In *11th World Congress in Mechanism and Machine Science (IFToMM2003)*, pages 1906–1911, Tianjin, China, April 1-4 2004.
- [27] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. In *Proc. IMechE (London)*, volume 180, pages 371–386, 1965.
- [28] J. Stolfi. *Oriented Projective Geometry*. Academic Press, 1991.
- [29] J. Wang and O. Masory. On the accuracy of a Stewart platform - Part I : The effect of manufacturing tolerances. In *Proc. ICRA93*, pages 114–120, 1993.
- [30] X. Zhao and S. Peng. Direct displacement analysis of parallel manipulators. *Journal of Robotics Systems*, 17(6) :341–345, 2000.