HAL
open science

Conception de robots à pattes dans un objectif d'applications industrielles

Hai Yang, Sébastien Krut, Cédric Baradat, François Pierrot

To cite this version:

Hai Yang, Sébastien Krut, Cédric Baradat, François Pierrot. Conception de robots à pattes dans un objectif d'applications industrielles. CFM'2011: 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. pp.2784-2791. lirmm-00643511

HAL Id: lirmm-00643511

https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00643511

Submitted on 22 Nov 2011

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.

Conception de robots à pattes dans un objectif d'applications industrielles

Hai Yang[a], Sébastien Krut[b], Cédric Baradat[a], François Pierrot[b]

a. *TECNALIA, Cap Omega, Rd-Pt B. Franklin, 34960 MONTPELLIER*
b. *UM2-CNRS, LIRMM, Département robotique, 161 rue Ada, 34392 MONTPELLIER*

Résumé :

Les robots à pattes sont connus pour leurs capacités de franchissement dans des environnements non structurés. Leur usage n'est pas évident dans un contexte de robotique industrielle. Dans cet article, plusieurs techniques sont présentées pour concevoir des robots à pattes capables de se déplacer et d'effectuer des tâches d'usinage. Les modèles géométriques directs et inverses du robot proposé sont calculés afin de simuler les modes de relocalisation et d'usinage du robot.

Abstract :

Legged robots are famous for their good terrain passover capacity. However, few of them have been used to solve industrial problems. In this paper, several considerations for designing industry oriented robots which combine the mobility of legged robots and advantages of parallel mechanisms for machining are outlined. The kinematic models of a proposed robot are derived for simulating its gait motion.

Mots clefs : Robot Mobile ; Robot Parallèle ; Cinématique

1 Introduction

Les robots à pattes sont connus pour leurs capacités de franchissement adaptées à la locomotion dans des environnements non structurés ou bien encombrés [1]. Cependant, leur usage n'est pas évident dans un contexte de robotique industrielle, où il s'agit d'usiner ou bien de manipuler des composants manufacturés. Les robots humanoïdes bipèdes, les quadrupèdes, ainsi que les hexapodes ont des jambes dont toutes les articulations sont actionnées. Trois actionneurs sont nécessaires pour positionner le pied de type "pinpoint" à un point dans l'espace où aucune orientation n'est demandée [2]. C'est pourquoi un quadrupède typique possède 12 actionneurs et un hexapode possède 18 actionneurs. Lorsque l'orientation du pied doit être contrôlée pour bien s'adapter à la forme du terrain, plus de cinq actionneurs doivent être utilisés pour chaque jambe. Il est donc difficile d'envisager ce type de robots à pattes pour des applications de fabrication à cause de leur nombre d'actionneurs élevé.

Nous avons envisagé l'usage de robots à pattes pour des tâches d'usinage avec un espace de travail important. En effet, nous souhaitions profiter (1) des capacités de locomotion des robots à pattes pour parcourir un espace de travail plus grand que le robot lui-même, (2) de la présence des diverses pattes pour réaliser un actionnement en parallèle de la broche d'usinage pour obtenir de fortes rigidités. A la différence des robots à pattes classiques, nous avons envisagé l'utilisation de fixations aux extrémités des pattes pour se fixer rigidement au sol et ne pas être limité par l'action de la gravité. La Fig. 1 illustre ce que pourrait être un robot à pattes pour le perçage de pièces aéronautiques.

Dans cet article, les considérations de conception sont discutées. Nous proposons un robot à trois pattes (tripode) qui peut "marcher" sur les surfaces avec une courbure modérée. De plus, il peut fonctionner comme un manipulateur parallèle à six degrés de libertés (ddls) une fois qu'il est déployé sur la position de travail. Les modèles géométriques directs et inverses sont construits afin de réaliser la marche et des scénarios d'usinage.

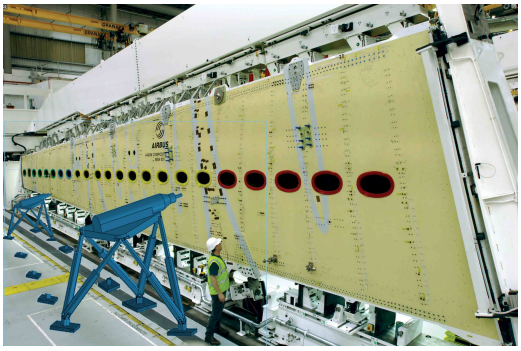


FIGURE 1 – Illustration du robot à pattes proposé travaillant sur un “wing box” d’avion

2 Principes pour la réduction du nombre d’actionneurs d’un robot à pattes

Au lieu d’actionner chaque patte de manière indépendante, les actionneurs dans l’une des pattes peuvent aussi contribuer à positionner les autres pattes. Ceci n’aidera à réduire le nombre d’actionneurs. Généré par les actionneurs dans les pattes d’appui, le mouvement de la nacelle du robot peut aussi servir pour le positionnement de la patte en phase de déplacement [3].

Pour les robots mobiles conventionnels, l’actionnement pour le déplacement et pour la manipulation est souvent fourni par deux systèmes indépendants. Afin de réduire le nombre d’actionneurs, la mobilité pour la locomotion peut aussi être utilisée pour la manipulation [4, 5].

Les robots à pattes, avec leurs chaînes cinématiques fermées entre la plate-forme mobile et le sol, peuvent être considérés comme des mécanismes parallèles. En remarquant que la présence d’articulations passives dans les branches des robots parallèles conventionnels aide à construire des robots légers avec une rigidité relativement élevée, des articulations passives seront introduites dans la conception de robots à pattes à cet effet. Toutefois, afin de maintenir le mécanisme contrôlable, le verrouillage de certains des axes doivent être intégrés sur certaines des articulations passives. Les verrouillages peuvent temporairement éliminer les ddls passifs dans la chaîne cinématique quand cela est nécessaire [6].

Pour les robots qui sont censés effectuer les manipulations avec une grande raideur et une bonne précision, une connexion solide entre le robot et le support (le sol, l’outillage, la pièce elle-même, etc.) est obligatoire. La force de connexion peut être assurée par un dispositif magnétique, un dispositif de dépression d’air ou un système de serrage mécanique.

3 Description et fonctionnement du tripode proposé

3.1 Description géométrique

Avec trois branches identiques montées symétriquement sur un cercle, un tripode peut être formé. Chaque branche du tripode a six ddls, deux d’entre elles sont motorisées. La Fig. 2 montre un tel mécanisme où se trouve une structure plane à deux ddls formée entre les trois axes parallèles (a, b et c). Avec toutes les branches attachées aux points d’appui, une telle structure peut être considérée comme une plate-forme de Stewart. La géométrie du mécanisme proposé peut être décrite par les paramètres géométriques et les variables articulaires notés dans la Fig. 2.

Trois branches sont montées symétriquement sur la nacelle, les axes des dernières articulations de chaque branche étant coplanaires. ψ_p, défini comme l’angle entre les axes des deux dernières articulations de chaque branche, est égal à $\frac{2\pi}{3}$. La branche i est connectée sur la nacelle à $P_{L_i}P_{R_i}$. P_{C_i} est le point du milieu de $P_{L_i}P_{R_i}$ où la chaîne sérielle virtuelle équivalente se connecte à la nacelle. r_p est le rayon du cercle qui passe par les points de connexions P_{L_i}, P_{R_i} de toutes les branches. Il définit la taille de la nacelle. En outre, le repère fixé au centre de ce cercle, est appelé le repère $\mathscr{R}_P(P_O, u_p, v_p, w_p)$. Ce repère est attaché sur la nacelle ayant l’axe x pointé sur P_{c_1}. θ représente l’angle entre $P_OP_{L_i}$ et $P_OP_{C_i}$. $\mathscr{R}_B(B_O, u_b, v_b, w_b)$ est le repère global qui est fixé sur l’objet de support. Attaché sur le corps de

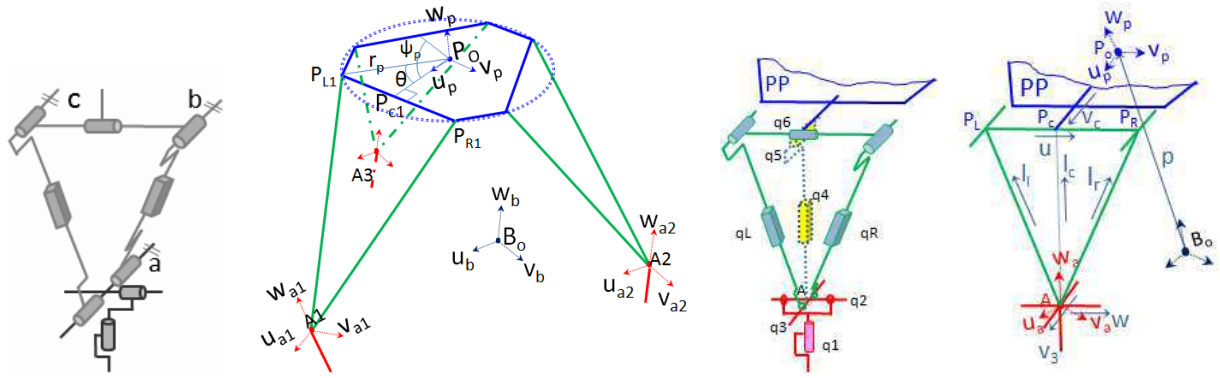


FIGURE 2 – Structure du tripode et ses branches

l'extrémité de la i^{ieme} branche, le repère $\mathscr{R}_{A_i}(A_i, u_{a_i}, v_{a_i}, w_{a_i})_{(i=1,\ 2,\ 3)}$ est placé au point A_i pour chaque branche.

La variable x (x_P ; y_P ; z_P ; α_P ; β_P ; γ_P) décrit la posture (la position et l'orientation) du repère $\mathscr{R}_P$ dans le repère fixe $\mathscr{R}_B$. $[x_p, y_p, z_p]^T$ est le vecteur de position du point P_O exprimé dans le repère global B_O. α_P, β_P et γ_P sont les rotations autour des axes u_b, v_b and w_b du repère global. De la même façon, x_{a_i} $(x_{A_i}\,;\, y_{A_i}\,;\, z_{A_i}\,;\, \alpha_{A_i}\,;\, \beta_{A_i}\,;\, \gamma_{A_i})_{(i=1,\ 2,\ 3)}$ est liée à la posture de l'extrémité de la i^{ieme} branche.

Le vector des coordonées articulaires $q = [qL_{L1}, qR_{L1}, qL_{L2}, qR_{L2}, qL_{L3}, qR_{L3}]^T$ correspond au déplacement des six articulations prismatiques dans les trois branches du robot. Les indices $L1$, $L2$ et $L3$ sont les indices des trois branches.

Le vecteur $si = [q_{1L_i}, q_{2L_i}, q_{3L_i}, q_{4L_i}, q_{5L_i}, q_{6L_i}]^T_{(i=1,\ 2,\ 3)}$ représente les valeurs des articulations des chaînes sérielles virtuelles équivalentes. La chaîne parallèle de la Fig. 2, qui donne la possibilité d'utiliser deux actionneurs linéaires identiques, peut être considérée comme une chaîne sérielle virtuelle en UPS (U signifie Universel et représente une liaison cardan, P Prismatique, S Sphérique). La variable s_i est le vecteur des coordnonées articulaires de la chaîne sérielle virtuelle à la i^{ieme} branche.

3.2 Modes de fonctionnement et scénario de travail

Le tripode fonctionne en deux modes : Mode "Payload Platform" (PP) et Mode "Branch Extremity" (BE). Ils sont utilisés pour réaliser des tâches d'usinage et de marche. Un scénario de travail d'un lieu de travail à l'autre peut être décomposé en différentes phases résumées comme suit :

Phase d'usinage (Mode PP) Avec toutes les branches attachées aux points d'appui, le robot fonctionne comme un manipulateur parallèle avec 6 ddls. D'un point de vue topologique, il peut être considéré comme une plate-forme de Stewart. En utilisant le modèle géométrique inverse, la nacelle est capable de suivre une trajectoire donnée dans son espace de travail.

Phase de reconfiguration pour le détachement (Mode PP) Pendant cette phase, tous les membres du robot sont encore attachés sur leurs points d'appui. Avant le verrouillage de certains des articulations, la nacelle se déplace à une posture précise afin de permettre aux articulations concernées d'atteindre les positions souhaitées b_i (définies ci-après) pour les verrouiller.

Phase de balancement de la branche (Mode BE) L'une des branches du robot est détachée de la base pour atteindre un autre point d'appui alors que les autres branches restent attachées à la base. Les articulations passives dans la branche en l'air doivent être bloquées dans le but de contrôler l'extrémité de la branche avant le détachement. De plus, comme il y a moins de branches connectées entre la nacelle et la base, les actionneurs dans les branches attachées au sol ne sont plus suffisants pour contrôler la nacelle. Certaines articulations passives ont besoin, elles aussi, d'être bloquées pour réduire les ddls de la nacelle. Avec les verrouillages activés, l'extrémité de la branche détachée peut suivre une trajectoire donnée.

4 Cinématique et simulation

4.1 Cinématique en Mode BE : BE comme "Branch Extremity"

Les modèles géométriques directs et les modèles géométriques inverses sont établis pour réaliser la simulation. Similairement à des robots parallèles classiques, la nacelle du tripode est considérée comme l'organe terminal dans le mode PP. Les modèles géométriques sont établis en fonction des équations fermeture de boucles et des méthodes numériques [7]. Dans cet article, seulement les modèles pour le mode BE sont adressés. Lorsque l'une des branches est détachée du point d'appui, un mécanisme hybride se forme : un mécanisme parallèle à six ddls actionné par quatre actionneurs avec un mécanisme à six ddls actionné par deux actionneurs.

En mode de commande BE, afin de contrôler l'extrémité de la branche, il ne peut pas y avoir de connectivité passive entre l'extrémité de la branche et la base. Par conséquent, les articulations passives q_1, q_2, q_3 et q_6 sur la branche détachée doivent être verrouillées avant qu'elles ne se détachent de leur point d'appui. Pour la même raison, afin de contrôler la nacelle avec les quatre actionneurs restants situés dans les deux branches en appui, les deux articulations q_1 (une dans chaque branche) doivent également être verrouillées. Nous introduisons les variables b_i qui dénotent les articulations bloquées pendant la phase de balancement de la branche i : $[q_{1L_i}\,;\, q_{2L_i}\,;\, q_{3L_i}\,;\, q_{6L_i}\,;\, q_{1L_j}\,;\, q_{1L_k}]$ pour $((i,\, j,\, k) \in \{(1,2,3),(2,1,3),(3,1,2)\}$; i : branches détachées ; $j,\, k$: branches en appui).

La posture de l'extrémité de la i^{ieme} branche est décrite par les variables (A_i). Donc le problème géométrique inverse du robot pendant le mode BE s'écrit naturellement comme : trouver les variables des actionneurs q connaissant les valeurs des données A_i. Comme pour le modèle géométrique direct des robots parallèles conventionnels, le calcul direct de A_i à q est difficile à obtenir en raison des équations fortement non linéaires (polynôme de degré 40 dans certains cas) [8].

Pour résoudre cette relation, le problème est de raisonner de manière différente : nous considérons que les verrouillages des articulations verrouillables ne sont pas activés, ce qui signifie que le robot fonctionne comme en mode PP. Ensuite, si la posture des points d'appui est légèrement modifiée, le robot sera encore capable de maintenir la nacelle dans la même posture en modifiant les valeurs des variables articulaires q. Par conséquent, les valeurs des articulations verrouillables b_i seront également changées. Pour calculer les valeurs de ces articulations passives verrouillables, un modèle géométrique inverse B_iIKMX est établi. x est l'entrée du modèle et b_i est la sortie.

Une approche basée sur la projection de vecteurs est utilisée pour résoudre $BiIKMX$. Quand les relations sont valables pour toutes les branches de manière indépendante, les indices des variables qui sont les indices des branches seront omis dans les équations. La fonction suivante est utilisée pour calculer l'angle signé entre deux vecteurs unitaires :

$$\Theta(\vec{V}_1,\vec{V}_2,\vec{N}) = \arctan 2(\vec{N}\cdot(\vec{V}_1\times\vec{V}_2),\vec{V}_1\cdot\vec{V}_2) \tag{1}$$

où $\vec{V}_1$,$\vec{V}_2$ sont deux vecteurs unitaires coplanaires, $\vec{N}$ est la normale de ce plan. Le vecteur unitaire résultant de la projection du $\vec{V}_1$ sur la normale à $\vec{V}_2$, noté ${}^{\perp\vec{V}_2}\vec{V}_1$, est calculé comme suit :

$${}^{\perp\vec{V}_2}\vec{V}_1 = \frac{\vec{V}_1-(\vec{V}_1\cdot\vec{V}_2)\times\vec{V}_2}{\|\vec{V}_1-(\vec{V}_1\cdot\vec{V}_2)\times\vec{V}_2\|} \tag{2}$$

Calcul de $BiIKMX$ Nous considérons les vecteurs de direction comme unitaires. Soit $\vec{v}_c$ le vecteur de direction $\overrightarrow{B_OP_C}$; soit $\vec{u}$ le vecteur de direction $\overrightarrow{P_LP_R}$ et soit $\vec{l}_c$ le vecteur de direction $\overrightarrow{AP_C}$ (Fig. 2). Nous définissons q_6 comme l'angle entre le plan P_LP_RA et le plan $P_OP_LP_R$. Les deux plans se croisent à P_LP_R, $\vec{v}_c$ est perpendiculaire à $\vec{u}$. q_6 peut s'écrire :

$$q_6 = \frac{\pi}{2} - \Theta({}^{\perp\vec{u}}\vec{l}_c,\vec{v}_c,\vec{u}). \tag{3}$$

Soit q_5, l'angle entre P_LP_R et AP_C. Il est calculée comme suit :

$$q_5 = \frac{\pi}{2} - \Theta(\vec{u},\vec{l}_c,\vec{u}\times\vec{l}_c). \tag{4}$$

q_4 représente la distance entre le point P_C et le point A :

$$q_4 = \|\overrightarrow{B_O P_C} - \overrightarrow{B_O A}\| \tag{5}$$

où $\overrightarrow{B_O P_C} = {}^p R_b \times \overrightarrow{P_O P_C} + \overrightarrow{B_O P_O}$, ${}^p R_b$ représente la matrice de rotation 3×3 du repère $\mathscr{R}_P$ dans le repère global $\mathscr{R}_B$: ${}^p R_b = RotZ(\gamma_P) RotY(\beta_P) RotX(\alpha_P)$. L'angle entre la projection de w_a dans le plan $P_L P_R A$ et $\vec{l}_c$ est égale à q_3. Soit $\vec{v}_3$, le vecteur selon da direction de l'axe de q_3. Il est toujours perpendiculaire au plan $P_L P_R A$. Donc, nous avons :

$$q_3 = \Theta(\vec{l}_c, {}^{\perp \vec{v}_3}\vec{v}_{wa}, \vec{v}_3) \tag{6}$$

où ${}^{\perp \vec{v}_3}\vec{v}_{wa}$ est le vecteur de direction de la projection de w_a sur le plan $P_L P_R A$.

q_2 est la valeur de l'angle entre ${}^{\perp \vec{v}_3}\vec{v}_{wa}$ et l'axe w_a de repère A. Elle peut s'écrire comme suit :

$$q_2 = \Theta({}^{\perp \vec{v}_3}\vec{v}_{wa}, \vec{v}_{wa}, \vec{u}) \tag{7}$$

Et, q_1 est l'angle entre l'axe u_a du repère A et ${}^{\perp \vec{v}_{wa}}\vec{v}_3$. Elle s'exprime ainsi :

$$q_1 = \Theta(\vec{v}_{xa}, {}^{\perp \vec{v}_{wa}}\vec{v}_3, \vec{v}_{wa}) \tag{8}$$

où ${}^{\perp \vec{v}_{wa}}\vec{v}_3$ est la projection de $\vec{v}_3$ dans le plan $u - v$ du repère A.

Calcul de $XFKMB\boldsymbol{i}$ En réalité, les valeurs des articulations verrouillées ne seront pas modifiées pendant le mode BE. Ainsi, le problème originel peut être transformé comme suit : lorsque les configurations des points d'appui sont changées, trouver les bonnes valeurs articulaires q qui permettront à toutes les articulations verrouillables de conserver à leurs valeurs données imposées b_i.

A partir de x, les variables articulaires q peuvent être calculées par le modèle géométrique inverse d'un robot parallèle traditionnel. Le problème peut encore être transformé en tant que : trouver la posture de la nacelle x qui permet à toutes les articulations verrouillables activées de rester égale à la valeur donnée b_i. Pour répondre à la question précédente, un modèle numérique $XFKMB_i$ est formulé sous la forme d'un problème d'optimisation : il consiste à trouver le x qui minimise $\|B_i IKMX(x) - b_i\|$.

4.2 Simulation du scénario

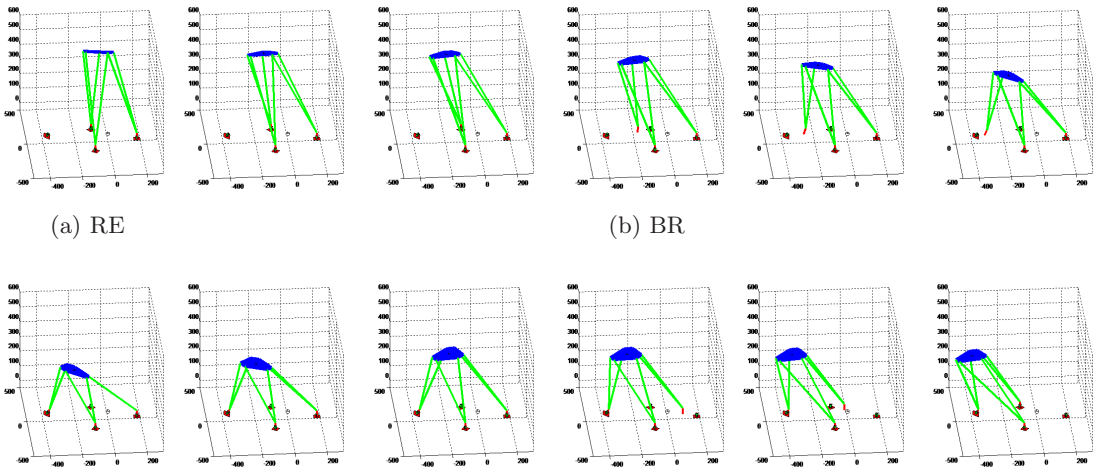
Un scénario de travail est simulé avec Matlab. Les résultats présentés dans la Fig. 3 montrent la faisabilité du concept de robot à pattes avec ddls réduits. En introduisant des articulations verrouillables, le robot est capable d'accomplir la tâche d'usinage et celle de reconfiguration automatique.

Il est important de signaler que, durant toutes ces phases, il y a au maximum une seule branche détachée du point d'appui. Grâce aux dispositifs de fixations aux extrémités des pattes, le robot a toujours des connexions rigides avec le sol. Contrairement à la plupart des robots marcheurs qui existent dans la littérature, les limitations de la marche dues à la friction entre les pieds et le sol, la force d'impact a l'atterrissage et le problème d'équilibre dynamique ou statique ne sont pas les préoccupations majeures tant que les éléments de verrouillage fonctionnent correctement.

5 Conclusion et perspectives

Dans cet article, plusieurs considérations importantes pour la conception de robots à pattes orientées vers l'industrie ont été présentées. Un manipulateur mobile qui combine les avantages des robots parallèles et celui des robots à pattes a été étudié. Avec les modèles géométriques directs et inverses construits, un scénario d'usinage à six axes et de marche à six axes a été simulé. Nous avons montré que : par l'intégration de verrouillages sur certaines articulations passives et certains dispositifs d'amarrage, six actionneurs sont suffisants pour construire un manipulateur à pattes qui puisse effectuer des tâches d'usinage à six axes, mais aussi marcher pour de se relocaliser.

Au travers la simulation réalisée, nous avons remarqué qu'il serait profitable d'avoir des possibilités de mouvement supplémentaires pour le robot étudié. En effet, pendant la phase de marche, l'extrémité



(a) RE (b) BR

(c) RE (d) BR

FIGURE 3 – Scenario de marche et d'usinage (Re : Reconfiguration, Br : Branche en l'air)

de la branche détachée est commandée par six actionneurs. Pour une posture donnée de l'extrémité de cette branche, le robot ne déspose pas de redondance cinématique. Donc, il ne peut pas décider de posture spécifique pour la nacelle pour éviter les interférences tout en assurant le suivi de la trajectoire de l'extrémité de la branche. L'une des solutions possibles consiste à ajouter une branche de plus pour soutenir la nacelle. Pendant la phase de marche, la connectivité entre BE et la surface d'appui sera de huit. Ce qui donne la possibilité de suivre sa propre trajectoire à BE et d'optimiser la trajectoire de la nacelle en même temps.

Références

[1] P. GonzalezDeSantos, E. Gracia, and J. Estremera, *Walking robots.* Springer London, 2007, ch. Quadrupedal Locomotion, pp. 3–32.

[2] K. Yoneda and Y. Ota, "Non-bio-mimetic walkers," *The International Journal of Robotics Research*, vol. Vol. 22, No. 3-4, pp. 241–249, 2003.

[3] J. M.Sabater, R. J. Saltaren, R. Aracil, E. Yime, and J. M. Azorin, "Teleoperated parallel climbing robots in nuclear installations," *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 33, pp. 381–386, 2006.

[4] T. Arai, N. Koyachi, H. Adachi, and K. Homma, "Integrated arm and leg mechanism and its kinematic analysis," in *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, vol. 1, Nagoya, Japan, May 1995, pp. 994–999.

[5] R. M. Voyles and A. C. Larson, "Terminatorbot : a novel robot with dual-use mechanism for locomotion and manipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 1, pp. 17–25, Feb. 2005.

[6] F. Aghili, "A conceptual design for reconfigurable robots," Canadian Space Agency, Tech. Rep., 2004.

[7] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. Volume 38, Issue 4, pp. 30–35, 1966.

[8] J. Nielsen and B. Roth, "On the kinematic analysis of robotic mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol. Vol. 18, No. 12, pp. 1147–1160, 1999.