Optimisation des modes de déplacement d'un robot à locomotion hybride roue-patte évoluant en milieux naturels

Christophe Grand, Faïz Ben Amar, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud

Laboratoire de Robotique de Paris Université de Paris 6 - CNRS FRE2507 18, route de Panorama 92265 Fontenay-aux-roses grand@robot.jussieu.fr

Résumé :

Cet article s'intéresse au problème de l'optimisation des modes de déplacement d'un robot à locomotion hybride roue-patte. Après une brève description du système mécatronique, nous présentons sa modélisation cinématostatique dont l'originalité repose sur l'intégration des interactions roue-sol en terrains naturels. Ces modèles analytiques sont ensuite exploités pour réaliser une analyse comparative des performances de locomotion pour chacun des modes sur différents terrains. Les critères considérés sont la marge de stabilité et la consommation d'énergie.

Abstract :

This article deals with the problem of locomotion modes optimization of an hybrid wheel-legged robot. After a brief mecatronic description of the system, we present his kineto-statics modeling whose originality is the integration of the wheel-ground interaction models in natural terrains. These analytical models are then exploited to carry out a comparative analysis of the performances of locomotion for each mode on differents terrains. The considered criteria are the stability margin and the energy consumption.

Mots-clefs :

Robot mobile ; hybride roue-patte ; terrains naturels ; performances de locomotion

1 Introduction

Les robots mobiles tout terrain trouvent leurs applications de nos jours dans plusieurs domaines. On identifie principalement l'exploration terrestre (polaire et volcanologique) ou planétaire (lune, mars) ainsi que les applications militaires ou civiles pour l'observation et la surveillance dans des environnements naturels. Les sols sur lesquels doivent évoluer ces engins présentent par endroit des difficultés de franchissement majeures qui se traduisent à la fois en terme de géométrie de la surface (discontinuités, relief, densité de roches...) et de nature physique du sol (sol meuble, sol non-cohésif, sable, éboulis,...).

L'introduction des mobilités internes dans la structure cinématique de l'appareil locomoteur des robots d'exploration répond à ce besoin d'une mobilité et d'une capacité de franchissement accrue. Nous pensons, en effet, qu'un des moyens permettant d'augmenter l'autonomie de déplacement d'un robot en milieu naturel ouvert, est de lui attribuer par sa conception et sa commande différents modes de déplacement. Ceux-ci lui permettent alors d'adapter le comportement de son système de propulsion de façon à optimiser les performances et le rendement énergétique de la tâche de locomotion.

L'idée d'utiliser des véhicules robotisés capables de se mouvoir suivant plusieurs modes de locomotion n'est apparue que récemment dans la littérature. Elle est souvent liée à la conception d'engins capables d'utiliser leurs organes de propulsion (roues, pattes, chenilles) suivant

différentes combinaisons et à l'adaptation de ces modes en fonction du type d'obstacle à franchir. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux sur le robot *Hybtor* [1], le *Roller-walker* [2] ou encore, plus récemment, le robot *Azimut* développé à l'Université de Sherbrooke [3].

Le choix et l'adaptation du mode de déplacement est la clé de voûte des systèmes de locomotion multi-modes, car les performances globales du véhicule pour l'exécution d'une mission donnée en dépendent. Ce choix suppose une comparaison à la fois qualitative et quantitative de ces différents modes de déplacement. Pour effectuer cette comparaison, il est nécessaire de définir des critères mesurant les performances de locomotion tels que la stabilité, et l'efficacité de la transmission de puissance à l'interface roue-sol. On intéresse donc ici à l'évaluation de ces critères pour la comparaison des modes de locomotion dans le cas particulier du robot Hylos.

2 Description du robot Hylos et des modes de locomotion associés

Le robot Hylos (voir figure 1(a)) est un prototype expérimental de système de locomotion hybride roue-patte. Il est constitué d'une plate-forme à 4 roues-pattes possédant au total 16 degrés de liberté pilotés. Il mesure environ 70 cm de long pour un poids de 12 kg. Chaque patte possède 2 liaisons pivot à axes parallèles, actionnées par des mécanismes à pantographe, et dispose à son extrémité d'une roue motrice et directrice. Il est équipé de 2 inclinomètres mesurant les angles de roulis et de tangage de la plate-forme, ainsi que de quatre capteurs d'effort 3 axes intégrés dans la structure de chaque patte et permettant la mesure des efforts d'interaction roue-sol. Le système de commande du robot est distribué sur une architecture de calcul multi-processeurs permettant de distinguer les commandes bas-niveau de chaque patte, de la commande haut-niveau de l'ensemble du robot.



FIG. 1 – (a) Le robot Hylos - (b) Synoptique général de commande

La structure du mécanisme de locomotion des robots à propulsion hybride roue-patte permet d'envisager le déplacement du système suivant différents modes, en fonction de la combinaison de mouvements considérés entre les roues et les pattes. Il est possible d'imaginer un grand nombre de modes de déplacement. Cependant, en considérant la structure cinématique spécifique du robot Hylos, nous nous intéressons plus particulièrement dans cet article à trois modes qui peuvent être décrits suivant la nature et le contexte opérationnel de ces modes.

• Le mode "roulement simple" (Mode 1) est un mode de déplacement trivial. Seules les roues sont utilisées dans ce mode et les mobilités internes restent fixes dans une configuration dite "nominale" illustrée sur la figure 2(a). Le mode par roulement simple sera employé pour déplacer le véhicule sur des sols relativement horizontaux ne présentant pas de fortes irrégularités et d'obstacles de type discontinuité.

- Dans le mode roulement avec reconfiguration (Mode 2), les mobilités internes sont utilisées afin de modifier la posture du robot lorsqu'il se déplace sur un terrain irrégulier. Une posture dite "sous-optimale" est déterminée en considérant l'optimisation des performances de locomotion. Elle vise principalement à atteindre une posture pour laquelle les composantes verticales des efforts de contact sont également distribués sur les quatre roues [4]. La posture du robot est asservie au cours du déplacement sur cette posture sous-optimale en utilisant une loi de commande à retour d'état linéarisant [5]. Cette reconfiguration de posture permet, en outre, un ajustement de la garde au sol et une optimisation de la marge de stabilité.
- Le mode péristaltique (Mode 3) est un mode de déplacement de type rampant inspiré par le mécanisme de locomotion de certains insectes comme la chenille [6]. La mise en œuvre de ce mode sur le robot Hylos consiste en une séquence de mouvements assurant le déplacement de chaque patte l'une après l'autre. Lors du déplacement des pattes, les mobilités de la patte et de la roue sont utilisées conjointement dans un schéma de commande en effort assurant une pression de contact constante et réglable. Le déplacement effectif du véhicule correspond au transfert du centre de masse du robot qui est obtenu par un actionnement coordonné des mobilités internes (les roues étant bloquées et fixes par rapport au sol). La transmission de puissance dans la liaison roue-sol se fait donc lorsque les roues sont statiques, ce qui permet d'augmenter la capacité de propulsion même si l'efficacité de traction est faible pour le sol considéré. Ce mode de locomotion est donc plus particulièrement adapté au franchissement de pente dont le sol présente une faible cohésion (dune de sable, volcan, éboulis ...).



(a) Mode 1 : roulement simple





(c) Mode 3 : déplacement péristaltique

FIG. 2 - Illustration des modes de déplacement

3 Modélisation cinémato-statique du système

L'évaluation qualitative des performances de locomotion des différents modes de déplacement s'appuie sur la modélisation du robot et de ses interactions avec l'environnement. On suppose que le robot se déplace suffisamment lentement pour considérer l'hypothèse de mouvement quasi-statique avec un contact au sol permanent. Le glissement est pris en compte par des modèles dit "terra-mécanique" d'interaction roue-sol. Les équations cinématiques qui relient les vitesses opérationnelles de la plate-forme $\dot{\mathbf{x}}$ (vitesse de translation et de rotation) aux vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ de l'ensemble des chaînes rouespattes s'expriment sous la forme :

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{v}_{\mathbf{g}} \tag{1}$$

De plus, les équations d'équilibres sont obtenues en appliquant le principe des travaux virtuels :

$$\mathbf{L}^{\mathrm{t}}\mathbf{f} + \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad \mathrm{et} \quad \mathbf{J}^{\mathrm{t}}\mathbf{f} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}_{\mathrm{s}} = \mathbf{0}$$
 (2)

Dans ces équations constituant le modèle cinémato-statique du robot : $\mathbf{f} = (f_i)$ est le vecteur des efforts de contact exprimés dans les repères de contact de chaque roue $\mathcal{R}_i = (C_i, \mathbf{t_i}, \mathbf{l_i}, \mathbf{n_i})$, \mathbf{L} et \mathbf{J} sont respectivement la matrice de locomotion du robot et la matrice jacobienne de l'ensemble des chaînes roues-pattes, $\mathbf{v_g}$ est le vecteur des vitesses de glissement de chaque roue et $(\mathbf{w}, \mathbf{w_s})$ sont les efforts généralisés dûs au poids respectifs de la plate-forme et de chaque sous-ensemble roue-patte [4].

Les efforts d'interaction s'expriment pour chaque contact roue-sol dans le repère de contact \mathcal{R}_i sous la forme $\mathbf{f_i} = (T_i - R_i, L_i, N_i)^t$, où T_i est l'effort de traction net, R_i est l'effort de résistance au roulement et L_i , N_i les composantes d'effort respectivement latérale et normale. L'effort de résistance au roulement est principalement dû à la compaction du sol. Pour une roue de diamètre D et de largeur b, il s'exprime suivant le modèle de Bekker [7] en fonction des paramètres de sol k_c , k_{ϕ} , n:

$$R_{i} = b \left[(k_{c}/b + k_{\phi}) \frac{z_{i}^{n+1}}{n+1} \right] \qquad \text{et} \qquad z_{i} = \left[\frac{3N_{i}}{b(3-n)(k_{c}/b + k_{\phi})\sqrt{D}} \right]^{\left(\frac{2}{2n+1}\right)} \tag{3}$$

où z_i correspond à l'enfoncement de la roue dans le sol. Les composantes d'effort dans le plan tangent (efforts de cisaillement) s'expriment en fonction des paramètres de glissement s_i et α_i qui sont respectivement le taux de glissement longitudinal et l'angle de dérive :

$$\begin{cases} T_i = F_i \cos \xi_i \\ L_i = F_i \sin \xi_i \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tan \xi_i = \frac{1-s_i}{s_i} \tan \alpha_i \\ u_i = \sqrt{(1-s_i)^2 \tan^2 \alpha_i + s_i^2} \\ F_i = (A_i c + N_i \tan \phi) \left[1 - \frac{K}{u_i l} \left(1 - exp(\frac{-u_i l}{K}) \right) \right] \end{cases}$$
(4)

où K est le module de cisaillement du sol, c sa cohésion, ϕ son angle de frottement et A_i l'aire de contact [8, 9].

4 Évaluation des performances de locomotion

Dans cette section, nous proposons de qualifier la mobilité du robot Hylos en fonction des paramètres du sol. Nous rappelons que l'objectif est d'adapter les modes de déplacement en fonction des conditions opérationnelles du robot. Dans cette étude, les paramètres de sols sont supposés connus et on considère les deux terrains décrits dans le tableau 1. Les modèles cinémato-statique et terra-mecanique sont utilisés pour évaluer les performances de déplacement du robot en terme de stabilité et de consommation d'énergie.

Marge de stabilité Nous examinons ici la marge de stabilité définie dans [10], sur un terrain incliné pour différents angles θ d'orientation du robot par rapport à l'axe de plus forte pente. L'idée est d'évaluer la stabilité à la fois sur des pentes frontales ($\theta = 0$) et sur des pentes en

Id	Terrain	n	$K_c (\mathrm{kN/m^{n+1}})$	$K_{\phi} \; ({ m kN/m^{n+2}})$	c (kPa)	Φ (deg)	K (cm)
1	Sable sec	1,10	0,99	1528,43	1,04	28,0	0,70
2	Sable compact	0,79	102,0	5301,00	1,30	31,1	1,14

TAB. 1 – Paramètres de sol utilisés pour l'évaluation

devers ($\theta = \pm \pi/2$), ainsi que pour toutes les configurations intermédiaires. Notons que pour cette analyse la nature physique du sol n'a pas d'influence. La figure 3 représente la limite de stabilité sur un graphique polaire où le rayon correspond à l'angle de pente η et l'angle polaire est l'angle d'orientation θ par rapport à la pente. On constate que le mode 2 offre une limite de stabilité bien supérieure aux autres modes, en particulier quand le robot évolue sur une pente en dévers. En effet, l'apport de la reconfiguration est plus sensible en devers que sur une pente frontale car les dimensions du robot sont anisotropes (le robot est plus long que large). Le comportement irrégulier des courbes en mode 1 et 3 s'explique aussi par cette différence de dimension du robot. Par contre dans le mode 2, le comportement irrégulier est principalement dû aux limites de l'espace de travail des pattes.



FIG. 3 – Limite de stabilité pour différentes configurations de pente

Consommation d'énergie Nous analysons la consommation d'énergie du robot lors de son déplacement sur une pente frontale ($\theta = 0^{\circ}$) pour chaque modes et pour chaque terrains du tableau 1. Les courbes de la figure 4 représentent l'énergie par unité de distance parcourue en fonction de l'angle de pente η . Nous pouvons noter que le mode 1 est le plus efficace pour des angles de pente faible, tandis que le mode péristaltique devient plus efficace après un certain angle critique η_c . Ceci peut être expliqué en considérant que la résistance de roulement réduit la capacité de traction des modes se déplaçant par roulement (mode 1 et 2). La consommation d'énergie augmente considérablement après une certaine limite qui correspond à la limite d'adhérence. L'angle critique η_c pour le terrain de type 2 est plus grand que pour le terrain de type 1. En effet, le terrain 2 est plus dur (la rigidité verticale équivalente $k_{\phi} + k_c/b$ est plus grande), par conséquent le tassement du sol et donc la résistance au roulement sont moins importants.



FIG. 4 – Consommation d'énergie en fonction de la pente

5 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article les différents modes de locomotion pouvant être exécutés par le robot hybride roue-patte Hylos. L'évaluation de ces modes, en s'appuyant sur des critères caractérisant l'autonomie et les performances de locomotion du système, ont été étudiées. Cette étude permet de faire une comparaison des modes de locomotion en fonction des variations des propriétés géométriques (angle de pente) et physiques du sol. Cela conduit à établir une corrélation a priori entre les propriétés physio-géométriques de l'environnement d'exploration et le mode de locomotion optimal.

Références

- [1] I. Leppänen, S. Salmi, and A. Halme. Workpartner hut-automation's new hybrid walking machine. In *Proc. of CLAWAR : Int. Conf. on Climbing and Walking Machine*, 1998.
- [2] S. Hirose and H. Takeuchi. Study on roller-walker (basic characteristics and its control). In *Proc.* of *ICRA* : *IEEE/Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3265–3270, 1996.
- [3] F. Michaud, D. Létourneau, J.-F. Paré, M.-A. Legault, and R. Cadrin. Azimut a leg-track-wheel robot. In *Proc. of IROS : IEEE/Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [4] Ch. Grand, F. BenAmar, F. Plumet, and Ph. Bidaud. Stability and traction optimisation of high mobility rover. *The International Journal of Robotics Research*, 23(10-11):1041–1058, Oct. 2004.
- [5] Ch. Grand, F. BenAmar, F. Plumet, et al. Decoupled posture and trajectory control of the hybrid wheel-legged robot hylos. In *Proc. of ICRA : IEEE/Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2004.
- [6] J. Brackenbury. Fast locomotion in caterpillars. Journal of Insect Physiology, 45(6), 1999.
- [7] M.G. Bekker. Introduction to terrain-vehicle systems. The University of Michigan Press, 1969.
- [8] Ch. Grand. Optimisation et commande des modes de déplacement des systèmes locomoteurs hybrides roue-patte. Application au robot Hylos. Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 2004.
- [9] A. Grecenko. Some applications of the slip and drift theory of the wheel. In *Proc. of the Int. Conf. of Society of Terrain Vehicle Systems*, Detroit, 1975.
- [10] E. Papadopoulos and D. Rey. A new mesure of tipover stability for mobile manipulators. In *Proc.* of *ICRA* : *IEEE/Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3111–3116, 1996.