

Christine Chevallereau
IRCCyN
1, rue de la Noë, BP 92101
44231 NANTES Cedex 3
Tél. : +33 2 40 37 69 61 Fax : +33 2 40 74 69 30
E-mail : Christine.Chevallereau@irccyn.ec-nantes.fr

Rapport sur le mémoire de thèse de
Monsieur Maximilien Naveau
en vue de l'obtention du grade de docteur
de l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées

Titre de la thèse :

Advanced human inspired walking strategies for humanoid robots

Analyse du mémoire :

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la locomotion des robots humanoïdes avec pour objectif de valider expérimentalement sur le robot HRP2 des modes de déplacements variés : sur sol plat, dans des escaliers avec ou sans appui, avec ou sans objet à tirer, en ligne droite ou selon des trajectoires courbes. Ses travaux s'appuient sur une approche « commande optimale » et le souci constant d'implémentation se traduit par la nécessité de pouvoir mener les calculs en « temps réel ». Ses principales contributions concernent l'amélioration d'un algorithme de marche sur sol plat et la proposition d'un algorithme pour de la locomotion multi-contacts.

Le travail a été effectué dans le contexte du projet européen KoroïBot, ce qui a amené Maximilien Naveau à travailler en étroite collaboration avec différentes équipes impliquées dans le projet et à implanter et tester sur le robot HRP2 des approches de locomotion qui utilisent ses commandes bas niveau et intègrent aussi des mouvements choisis pour le centre de masse ou pour le haut du corps. Ces différentes extensions ont montré la robustesse et la polyvalence de son approche.

Le mémoire de thèse de 117 pages rédigées en anglais, comporte 6 chapitres plus une introduction, une conclusion, 1 annexe et plus de 150 références.

Le chapitre d'introduction présente très clairement les objectifs du projet européen KoroïBot, les défis choisis par le LAAS, et les objectifs de la thèse. Pour servir ensuite de comparaison, les indicateurs de performance clefs correspondant à la locomotion de HRP2 pour la marche sur terrain plat et dans les escaliers sont donnés en début de projet. Maximilien Naveau présente ensuite la locomotion des robots humanoïde vus comme un problème d'optimisation, l'environnement étant supposé connu. Une bibliographie partielle qui sera complétée dans les chapitres suivants est présentée.

Maximilien Naveau présente dans le chapitre 1 son générateur de mouvement de marche pour des déplacements sur terrain plat via une approche de commande prédictive non linéaire fonctionnant en temps réel. Comme pour les générateurs de mouvements de marche dont il est inspiré [Kajita

2003, Herdt 2010], une commande prédictive est utilisée en supposant le jerk du CoM constant sur un intervalle de commande. A partir d'une consigne pour le centre de masse et l'orientation du tronc, l'algorithme fournit en ligne l'évolution du centre de masse et la pose et l'orientation des pieds en prenant en compte l'évitement des obstacles. La solution obtenue en temps réel s'appuie sur l'hypothèse qu'une itération de l'algorithme d'optimisation à chaque pas de calcul est suffisante. La prise en compte des obstacles est traitée via l'ajout d'une contrainte linéaire. Un filtre dynamique est proposé pour tenir compte de la dynamique du robot plus finement que via le modèle du pendule inverse. Cet algorithme est un résultat majeur de ce travail de thèse puisque qu'il permet des expérimentations réussies sur HRP2 pour une commande réactive qui permet d'éviter les obstacles et de choisir en ligne les déplacements du robots. La présentation concise des résultats permet de comprendre la démarche proposée mais laisse quelques points en suspens concernant en particulier le choix des gains du critère optimisé et le filtrage dynamique. Curieusement, pour des robots supposés identiques le HRP2 du JRL et le HRP2 du LAAS, le filtrage dynamique proposé est nécessaire sur le dernier robot mais pas sur le premier. Dans ce contexte il aurait été intéressant de montrer l'effet en simulation et en réalité de la position du centre de pression, avec et sans filtrage dynamique et de donner des précisions sur les paramètres dynamiques du robot et leur identification/calcul. Dans le critère utilisé pour produire la commande, un poids très important est donné à la distance entre le CoP et la cheville, pourtant une contrainte de stabilité est aussi définie. N'aurait-il pas été opportun de réduire dans cette contrainte la taille du pied pour accroître la marge de stabilité. Des commentaires sur le suivi des vitesses de déplacements spécifiés (hors obstacles) auraient aussi été appréciables.

Le chapitre 2 concerne la locomotion multi-contact. Une application pour la montée d'un escalier avec appui sur une rampe illustre les résultats. Ce travail est le fruit d'une collaboration avec l'université de Heidelberg. Les points d'appui sont supposés connus. Une évolution du centre de masse est déduite alors que les efforts de contact sont les variables d'optimisation. On notera en particulier que l'utilisation d'un appui sur la rampe permet de réduire le cout énergétique de la montée d'escalier de 25%. Ensuite un second algorithme plus performant développé au LAAS est brièvement présenté. L'explication de la meilleure performance du second algorithme aurait pu être plus approfondie. Des essais expérimentaux valident les résultats obtenus en simulation, pourtant on peut s'interroger sur la possibilité de faire exécuter au robot HRP2 le mouvement et les forces d'interactions définis par optimisation. En effet en appui multiples, une redondance d'actionnement apparaît or sur le robot HRP2 seule des consignes de position sont accessibles, comment peut-on agir sur les efforts internes pour avoir les forces d'interaction prévues ?

Les travaux menés dans les chapitres suivants montrent comment l'approche proposée au chapitre 1 pour définir un générateur de mouvement de marche peut être intégrée dans des stratégies plus haut niveaux pour permettre au robot HRP2 d'accomplir des tâches variées.

L'application étudiée au chapitre 3 concerne la possibilité pour le robot HRP2 de pouvoir tirer et transporter une lance d'incendie. L'effort à fournir étant important, une dérive naturelle de la direction d'avance doit être corrigée. La stratégie proposée comprend deux niveaux. D'une part, pendant les phases de double appuis, une commande en force est définie pour la main portant la lance. D'autre part, une correction en ligne de l'évolution du centre de masse est demandée au générateur d'allure de marche en s'appuyant sur une mesure externe fournie par un système de capture de mouvement en négligeant les efforts liés au transport de la lance à incendie. Comme le mentionne Maximilien Naveau en conclusion, il aurait été intéressant de prendre en compte l'effort

de traction dû à la lance dans le générateur d'allure de marche. Cet effort modifierait l'évolution du CoM et permettrait probablement de réduire significativement par anticipation la dérive observée.

Le travail présenté dans le quatrième chapitre est réalisé en collaboration avec le Weizmann Institute of Science. Il montre comment la vitesse du robot peut être liée à la courbure de la trajectoire à suivre pour obtenir des allures proches des allures humaines. L'intégration avec le générateur de mouvement proposé est directe, et un bouclage externe utilisant la capture de mouvement est utilisé pour ramener le robot vers la trajectoire cible. En simulation, on observe que la loi de puissance $1/3$ pour réguler les erreurs de positionnement est bien adaptée puisqu'elle permet de réduire les erreurs plus efficacement que d'autres valeurs. En expérimentation les résultats sont moins probants. On retiendra de ces essais que l'intégration du générateur de mouvement proposé par Maximilien Naveau dans des corrections plus haut niveau est aisée. Par contre le recours à une localisation par capture de mouvement semble peu réaliste pour une réelle application, et il serait intéressant de voir comment transposer ce travail dans un autre système de localisation basé sur la vision par exemple.

Le travail très intéressant proposé dans le chapitre 5 concerne une architecture de commande pour obtenir des mouvements de locomotion complets incluant le haut du corps, par exemple pour aller chercher un objet dans un tiroir. A partir de mouvements complexes d'un humain, des primitives de mouvements adaptés à la cinématique du robot sont définies hors ligne. Ensuite la synthèse de mouvements via des enchainements gérés par des oscillateurs est développée mais ceci n'assure pas la faisabilité des mouvements et le maintien de l'équilibre. L'approche proposée fait donc appel à l'algorithme développé au chapitre 1 pour obtenir les mouvements articulaires à produire par le robot, à partir des vitesses désirées du CoM et des mouvements du haut du corps. Cette étude illustre bien l'intérêt du filtrage dynamique. Le chapitre est illustré par de nombreuses vidéos qui montrent bien les différentes étapes.

Les différents résultats obtenus dans la thèse ont aussi été utilisés pour faire la preuve du concept d'utilisation d'un robot humanoïde pour réaliser des tâches dans un environnement industriel pour la société Airbus, comme ceci est illustré dans le chapitre 6.

La thèse se termine par une conclusion rappelant les contributions et les améliorations obtenues en terme d'indicateurs de performance définis dans l'introduction. On notera par exemple que les travaux menés ont permis de passer d'une vitesse maximale d'avance de 0.125m/s à 0.4m/s pour le robot HRP2. Des perspectives sont aussi proposées avec un intérêt pour la réduction des temps de calcul et la robustesse des approches.

Avis du rapporteur :

Un travail important en quantité et qualité a été réalisé au cours de la thèse de Maximilien Naveau. Il est incontestable que l'expérience acquise par Maximilien Naveau sur la marche des robots humanoïdes et leur mise en œuvre expérimentale est exceptionnelle. Il a dû aborder différents aspects concernant les algorithmes d'optimisation, la modélisation dynamique, l'implémentation des commandes sur le robot, des algorithmes plus haut niveau pour la génération de consigne, le bouclage via un système de capture de mouvement, il a donc une large connaissance de tous ces aspects.

Cette thèse effectuée dans le cadre de projets collaboratifs a aussi été l'occasion de nombreuses collaborations et la rédaction du manuscrit a bien mis en évidence les contributions de chacun.

Pour toutes ces raisons, je donne un avis très favorable pour que Monsieur Maximilien Naveau soutienne sa thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées.

Fait à Nantes le 30 août 2016.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Chevallereau', written over a horizontal line.

Christine Chevallereau
Directeur de recherche CNRS