

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
ÉCOLE DOCTORALE EEATS

THÈSE CIFRE

PRÉSENTÉE PAR

JORY LAFAYE

LABORATOIRE : INRIA GRENOBLE RHÔNE-ALPES
ENTREPRISE : ALDEBARAN

**Commande des mouvements et de l'équilibre
d'un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles**

Directeur :

Dr. Bernard Brogliato, Inria

Encadrants :

Dr. Pierre-Brice Wieber, Inria

Dr. Cyrille Collette, Aldebaran

Dr. Sebastien Dalibard, Aldebaran

Table des matières

Résumé	5
I Introduction	6
I.1 Contexte d'étude	7
I.2 État de l'art	7
I.2.1 Commande et équilibre des robots à roues	7
I.2.1.1 Les robots à une et deux roues	7
I.2.1.2 Les robots à trois roues et plus	7
I.2.2 Commande et équilibre des robots bipèdes	7
I.2.3 Synthèse et conclusion	7
I.3 Contributions scientifiques	7
I.4 Plate-forme expérimentale	7
I.5 Contributions techniques	7
I.6 Organisation du document	7
II Modélisation du système	8
II.1 Choix du modèle et conséquences	8
II.2 Modélisation dynamique	9
II.2.1 Problème de complémentarité mixte	9
II.2.2 Les trois roues en contact avec le sol	10
II.2.3 Le robot bascule sur deux roues	10
II.3 Modélisation de la dynamique future	10
II.3.1 Nécessité de prédire le futur	10

II.3.2	Choix de la dynamique d'extrapolation	10
II.3.3	Formulation du modèle prédictif	11
III	Commande par modèle prédictif	12
III.1	Principe	12
III.2	Outil mathématique et contraintes associées	12
III.3	Formulation des problèmes d'optimisations	13
III.3.1	Introduction	13
III.3.2	Lorsque les trois roues sont en contact avec le sol	13
III.3.2.1	Formulation des objectifs	13
III.3.2.2	Formulation des contraintes	13
III.3.2.3	Problème quadratique résultant	14
III.3.3	Lorsque le robot bascule sur deux roues	14
III.3.3.1	Formulation des objectifs	14
III.3.3.2	Formulation des contraintes	14
III.3.3.3	Problème quadratique résultant	14
III.3.4	Gestion de la transition entre les deux états	14
III.3.4.1	Formulation des objectifs	14
III.3.4.2	Formulation des contraintes	14
III.3.4.3	Problème quadratique résultant	15
III.4	Gestion des deux modèles dynamiques exclusifs	15
III.4.1	Choix d'un superviseur et conséquences	15
III.4.2	Fonctionnement du superviseur	15
III.4.3	Fonctionnement de l'estimateur d'impact	15
III.5	Vers une modélisation unifiée des deux dynamiques	15
III.5.1	Problème de complémentarité linéaire	15
III.5.2	Méthodes de résolution	16
IV	Mesures et observateurs	17
IV.1	Les différentes valeurs à observer	17
IV.2	Capteurs disponibles	17
IV.3	Méthodes de mesure et conséquences	17

IV.3.1	Mesure de la posture du robot	17
IV.3.2	Observation de la position de la base mobile	18
IV.3.3	Observation des vitesses et accélérations du robot et de la base	18
IV.3.4	Observation de l'angle de basculement et d'inclinaison du sol	18
V	Résultats et expérimentations	19
V.1	Schéma de contrôle en boucle fermée	19
V.2	Expériences en l'absence de perturbation et sur sol horizontal	19
V.2.1	Protocole expérimental	19
V.2.2	Analyse des expériences	20
V.3	Expériences de compensation de perturbations	20
V.3.1	Protocole expérimental	20
V.3.2	Analyse des expériences	20
V.4	Expériences de compensation de l'inclinaison du sol	20
V.4.1	Protocole expérimental	20
V.4.2	Analyse des expériences	21
VI	Synthèse	22
VI.1	Contributions	22
VI.2	Perspectives	22
VI.3	conclusion	22
	Bibliographie	22
	Annexes	23
A	Pepper, un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles	24
B	Optimisation du choix du modèle dynamique	25
C	Résolution d'un problème quadratique	26
D	"MPC-WalkGen", librairie C++ implémentant la commande par modèle prédictif	27

Table des figures

[1]

Chapitre I

Introduction

I.1 Contexte d'étude

I.2 État de l'art

I.2.1 Commande et équilibre des robots à roues

I.2.1.1 Les robots à une et deux roues

I.2.1.2 Les robots à trois roues et plus

I.2.2 Commande et équilibre des robots bipèdes

I.2.3 Synthèse et conclusion

I.3 Contributions scientifiques

I.4 Plate-forme expérimentale

I.5 Contributions techniques

I.6 Organisation du document

Chapitre II

Modélisation du système

II.1 Choix du modèle et conséquences

L'objectif de ce chapitre est de développer une modélisation dynamique d'un robot humanoïde possédant une base mobile à roues omnidirectionnelles. Ce modèle doit apporter un bon compromis entre fidélité vis à vis du comportement du robot réel et complexité, qui impacte de manière directe le temps de calcul. Notamment, il n'est pas nécessaire de modéliser tout les paramètres du robot : Représenter uniquement les dynamiques principales suffit à obtenir un contrôle précis du robot. La section V.1 détaillera les méthodes de compensation des éléments non modélisés.

Le choix se porte donc sur une modélisation dynamique d'un robot rigide multi-corps. Les éléments suivants ne seront donc pas modélisés :

- Les différentes élasticités. Les technologies d'actionnement utilisés sur la plate-forme expérimentale ne comportent pas d'élasticités notables. Le seul élément compliant est un ensemble de deux bandes élastiques attachés à l'articulation du roulis de la hanche permettant au robot de maintenir une posture droite en l'absence de contrôle du moteur. Cet élément est négligeable en terme de dynamique car la raideur associée est très faible.
- Les jeux mécaniques présents sur le robot. Ceux-ci sont présents sur la plate-forme expérimentale, du fait de systèmes de réductions présents entre les moteurs et l'articulation basés sur un système d'engrenages. Les effets dynamiques parasites apportés par le jeu mécanique ne sont pas négligeables. Cependant, il peuvent être compensés de manière suffisamment

efficace (plus de détails en section V.1) pour que cela soit transparent du point de vue de la commande présentée dans le chapitre III.

- Les glissements pouvant survenir entre les roues du robot et le sols ne sont pas modélisés. Ceux-ci peuvent être néanmoins handicapant, car le système devient en partie non-observable en présence de glissement (plus de détails en section IV.3.2). Une solution a été apportée en section III.3.2.1 afin de limiter leurs possibilités d'apparition ainsi que leurs impacts sur la dynamique du robot.
- Le nombre de corps choisi pour cette modélisation dynamique est nécessairement plus faible que le nombre de corps réels présents sur le robot, pour des raisons de complexité du modèle. Ainsi, tout les effets dynamiques ne pourront pas être représentés. Le choix du nombre de corps, et de leurs propriétés doit permettre de rendre négligeable les dynamiques non modélisées. Le développement d'une solution optimale du choix du nombre de corps et de leurs propriété est présenté en annexe B.

Le modèle présenté comporte deux corps. Le premier est attaché à la base mobile, de position b , de masse m_b et d'inertie I_b . Le second modélisera l'ensemble du reste du robot, de position c , de masse m_c et d'inertie I_c .

Le choix d'un modèle à deux corps permet de prendre en compte la rotation générale du corps du robot autour de la base mobile. Cette modélisation est pertinente dans le cas où les bras du robot ne génèrent que peu ou pas de moment d'inertie. Dans le cas contraire, nous considérerons que les effets parasites dû aux mouvements des bras pourront être compensés correctement par le schéma de contrôle en boucle fermée présenté en section V.1. Le choix de ce modèle est également conditionné par la répartition massique de la plate-forme expérimentale. Elle est principalement concentré en deux zones, qui correspondent aux corps choisis : la base mobile et le torse du robot.

II.2 Modélisation dynamique

II.2.1 Problème de complémentarité mixte

- Présentation des variables (c , b , forces de contact sur chaque roues)
- Equations des énergies cin/pot
- Contraintes sur la position de b donc problème de complémentarité sur les forces de contact

- Problème de résolution de ce problème de complémentarité mixte, il faut donc le séparer en plusieurs parties

II.2.2 Les trois roues en contact avec le sol

- Etat des forces de contact définies (toutes en contact)
- En dériver l'équation du cop (barycentre des forces de contact)
- Linéarisation et approximations

II.2.3 Le robot bascule sur deux roues

- Etat des forces de contact définies (seul deux des forces sont en contact)
- CoP fixé
- Changement de variable pour utiliser l'angle de basculement
- En dériver l'équation liant l'angle, c et b.
- Linéarisation et approximations

II.3 Modélisation de la dynamique future

II.3.1 Nécessité de prédire le futur

- Les contraintes dynamiques sont trop fortes pour autoriser un contrôle sans prédiction du futur à haute accélération.
- Démontrer en calculant les accélérations limites dans différents cas
- Non nécessité d'un modèle dynamique précis dans le futur (feedback, on ne calcule que la première commande)
- Permet d'assurer une stabilité à long terme (quelques secondes)

II.3.2 Choix de la dynamique d'extrapolation

- Contraintes : Linéarité entre les variables / accélérations continues donc polynome d'ordre 3
- Formulation de l'équation d'état

- Calcul des dérivées

II.3.3 Formulation du modèle prédictif

- Formulation du modèle prédictif
- Problème de controlabilité dans le cas de basculement.
- Inversions de matrice

Chapitre III

Commande par modèle prédictif

III.1 Principe

- Commande optimale sous contraintes
- Résoudre le problème sur un horizon donné, en utilisant un modèle prédisant le futur
- La solution optimale du système n'est pas connue si l'on ne connaît pas les objectifs et contraintes futures
- Exemple de faire un déplacement triangle
- Utilisation de la commande optimale dans la marche bipède.
- Intérêt lorsque les contraintes sont fortes par rapport aux dynamiques de mandées de mouvement

III.2 Outil mathématique et contraintes associées

- On veut faire tourner le programme rapidement.
- Il n'existe généralement pas de solution analytique à un problème d'optimisation sous contrainte
- on ne peut guère aller plus compliqué qu'une résolution quadratique sous contrainte linéaire
- On va donc utiliser une formulation de QP

- Ce type d'optimisation nous permet de minimiser une norme 2, ce qui est suffisant. Le temps de calcul ne dépend pas du nombre d'objectifs.
- Il faudra linéariser les contraintes du problème
- Le temps de calcul dépend du nombre de contraintes, il faudra donc choisir un ensemble de contraintes linéaires conservatives suffisamment petit, mais sans restreindre trop le système.
- Lien vers l'annexe pour expliquer comment on résout un qp

III.3 Formulation des problèmes d'optimisations

III.3.1 Introduction

- On ne peut pas résoudre simplement un problème de complémentarité mixte
- On décide de séparer la résolution du problème en 3 parties
- Expliquer les deux premières, dépendant des dynamiques
- Expliquer le problème avec la transition, et la non gestion de l'impact.
- Un superviseur est écrit permettant de gérer les différents états.

III.3.2 Lorsque les trois roues sont en contact avec le sol

III.3.2.1 Formulation des objectifs

- Tracking control
- Robustesse (CoP)
- Stabilité numérique (jerk)

III.3.2.2 Formulation des contraintes

- Respecter la dynamique : CoP
- Limites vitesses/accélérations de la base
- Respecter la cinématique : C-B

III.3.2.3 Problème quadratique résultant

- Ecrire le problème résultant

III.3.3 Lorsque le robot bascule sur deux roues

III.3.3.1 Formulation des objectifs

- Minimiser l'angle
- Minimiser la vitesse angulaire
- Stabilité numérique

III.3.3.2 Formulation des contraintes

- Contrainte sur l'angle > 0
- Respecter la cinématique : C-B
- Limites vitesses/accélérations de la base

III.3.3.3 Problème quadratique résultant

- Ecrire le problème résultant

III.3.4 Gestion de la transition entre les deux états

III.3.4.1 Formulation des objectifs

- Minimiser la vitesse
- Robustesse (CoP)
- Stabilité numérique (jerk)

III.3.4.2 Formulation des contraintes

- Respecter la dynamique : CoP
- Limites vitesses/accélérations de la base
- Respecter la cinématique : C-B

III.3.4.3 Problème quadratique résultant

- Ecrire le problème résultant

III.4 Gestion des deux modèles dynamiques exclusifs

III.4.1 Choix d'un superviseur et conséquences

- Problème de transitions entre les contrôleurs
- Il faut un superviseur qui gère les différents états
- Parler de l'estimateur d'impact
- Limitations due au superviseur : Détection tardive / inadéquate / Choix non optimal / Oscillations
- Avantages : Gérer de manière simple différents modèles dynamiques

III.4.2 Fonctionnement du superviseur

- Expliquer le fonctionnement du superviseur et des différents états

III.4.3 Fonctionnement de l'estimateur d'impact

- Détailler le fonctionnement de l'estimateur d'impact

III.5 Vers une modélisation unifiée des deux dynamiques

III.5.1 Problème de complémentarité linéaire

- Considérer uniquement un problème de basculement dans une direction
- dire que par la suite, se limiter à ce cas permet de gérer tout les cas, en faisant quelques hypothèses
- Enoncer la dynamique de complémentarité
- Problème : Il y a 2^n états possibles linéaires à la dynamique.

III.5.2 Méthodes de résolution

- Considérer que lorsque le robot ne bascule pas, la commande ne le fera pas basculer. On se retrouve dans le cas du premier programme d'optimisation uniquement

- Si un basculement est mesuré, faire un a priori qu'il n'y aura pas de rebond possible. Ainsi, il n'y a qu'une variable à choisir : le temps d'impact.

- On se retrouve avec un problème non-linéaire, qui devient linéaire en choisissant l'état de cette variable.

- Il y a n choix possibles.

- On peut résoudre n QP et choisir le plus optimal.

- Ou alors on peut résoudre 3 QP et faire converger l'état de la variable.

- Présenter le problème d'optimisation unifié

Chapitre IV

Mesures et observateurs

IV.1 Les différentes valeurs à observer

- Position / vitesse / accélération base et corps
- angle / vitesse angulaire / accélération angulaire basculement base
- angle de la pente

IV.2 Capteurs disponibles

- mre / imu

IV.3 Méthodes de mesure et conséquences

IV.3.1 Mesure de la posture du robot

- En utilisant les mre et le modèle théorique du robot
- Nécessite un bon modèle du robot et une bonne calibration

IV.3.2 Observation de la position de la base mobile

- On mesure la vitesse des roues. On en déduit la position de la base en intégrant dans le temps et en utilisant un modèle des roues
- Dérive due à l'intégration. Ne mesure pas les glissements sur le sol

IV.3.3 Observation des vitesses et accélérations du robot et de la base

- Celles-ci sont observées en utilisant la prédiction du mouvement du robot au prochain pas de temps (utilisation de la dynamique d'ordre 3)
- Mieux que dériver la position du robot, moins de sensibilité au bruit (dérivation, quantification, capteur)
- Moins réactif aux erreurs en vitesses et accélérations
- Le robot étant commencé en position pour le corps, et en vitesse pour les roues, cela n'a pas grande importance

IV.3.4 Observation de l'angle de basculement et d'inclinaison du sol

- Système de base non observable. On mesure la somme des deux angles avec les accéléros, et la somme des variations angulaire avec les gyro.
- Pas de capteurs de force sur les roues. On ne sait pas lesquelles sont au sol.
- Il faut faire des hypothèses pour rendre le système observable
- Problèmes : Non-détections et faux-positifs
- Considère que lorsque l'angle est constant, alors on est sur une pente
- Sinon, toute variation de l'angle est considéré comme un push
- Problèmes si on perturbe le robot avec une dynamique lente

Chapitre V

Résultats et expérimentations

V.1 Schéma de contrôle en boucle fermée

- Présenter les asservissements bas niveau (feedback)
- Parler de la cinématique inverse
- feedback en position de mpc
- Extrapolation pour compenser le retard capteur
- Stabilisation en utilisant seulement une partie de sensor
- Rejeter le jeu mécanique (threshold)

V.2 Expériences en l'absence de perturbation et sur sol horizontal

V.2.1 Protocole expérimental

- Trajectoire non réalisable (test de faisabilité)
- Variables : jeu de pondération / nombre de masses pendule / open et close-loop mpc
- Trajectoire réalisable (test de suivi)
- Influence des compensations retard capteur / command sensor / jeu mécanique

V.2.2 Analyse des expériences

- Intérêt du choix des pondérations
- Vers une adaptation automatique des pondérations
- Intérêt d'une boucle fermée plus rapide que l'échantillonnage du mpc
- Utilisation de deux masses au lieu d'une
- Influence de la compensation du retard dans le suivi de trajectoire
- Nécessité de rejeter le jeu mécanique
- Dû aux bruits, ne pas utiliser entièrement sensor

V.3 Expériences de compensation de perturbations

V.3.1 Protocole expérimental

- Faire basculer le robot
- Variable : Durée / puissance push / direction

V.3.2 Analyse des expériences

- Pas de recovery quand il n'y a pas besoin
- Minimisation de la vitesse d'impact (le robot peut reculer)
- Pousser trop fort emmène aux limites physique du robot
- Vers une utilisation des bras pour rééquilibrer

V.4 Expériences de compensation de l'inclinaison du sol

V.4.1 Protocole expérimental

- Faire rouler le robot préalablement sur une pente
- Faire monter / descendre une pente
- Modifier la direction de déplacement
- Modifier la nature du sol

- Push sur pente
- Pente variable

V.4.2 Analyse des expériences

- Vitesse limitée car roues qui décolle
- Problème de détection push / pente
- Compensation jusqu'à 5 degrés
- Problèmes de glissement au delà
- Cas limite de push pendant une montée de pente

Chapitre VI

Synthèse

VI.1 Contributions

VI.2 Perspectives

VI.3 conclusion

Bibliographie

- [1] S Miasa, M Al-Mjali, A Al-Haj Ibrahim, and T A Tutunji. Fuzzy control of a two-wheel balancing robot using dspic. In *2010 7th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD)*, pages 1–6, 2010.

Annexe A

Pepper, un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles

Annexe B

Optimisation du choix du modèle dynamique

Annexe C

Résolution d'un problème quadratique

Annexe D

**“MPC-WalkGen”, librairie C++
implémentant la commande par modèle
prédictif**