

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	6
I.2 État de l'art	6
I.2.1 Commande et équilibre des robots à roues	6
I.2.1.1 Les robots à une et deux roues	6
I.2.1.2 Les robots à trois roues et plus	6
I.2.2 Commande et équilibre des robots bipèdes	6
I.2.3 Synthèse et conclusion	6
I.3 Contributions scientifiques	6
I.4 Plateforme expérimentale	6
I.5 Contributions techniques	6
I.6 Organisation du document	6
II Modélisation du système	7
II.1 Choix du modèle et conséquences	7
II.2 Modélisation dynamique	7
II.2.1 Problème de complémentarité mixte	7
II.2.2 Les trois roues en contact avec le sol	7
II.2.3 Le robot bascule sur deux roues	8
II.3 Modélisation de la dynamique future	8
II.3.1 Nécessité de prédire le futur	8
II.3.2 Choix de la dynamique d'extrapolation	8
II.3.3 Formulation du modèle prédictif	8

III	Commande par modèle prédictif	9
III.1	Principe	9
III.2	Outil mathématique et contraintes associées	9
III.3	Formulation des problèmes d'optimisations	10
III.3.1	Introduction	10
III.3.2	Lorsque les trois roues sont en contact avec le sol	10
III.3.2.1	Formulation des objectifs	10
III.3.2.2	Formulation des contraintes	10
III.3.2.3	Problème quadratique résultant	10
III.3.3	Lorsque le robot bascule sur deux roues	10
III.3.3.1	Formulation des objectifs	10
III.3.3.2	Formulation des contraintes	11
III.3.3.3	Problème quadratique résultant	11
III.3.4	Gestion de la transition entre les deux états	11
III.3.4.1	Formulation des objectifs	11
III.3.4.2	Formulation des contraintes	11
III.3.4.3	Problème quadratique résultant	11
III.4	Gestion des deux modèles dynamiques exclusifs	11
III.4.1	Choix d'un superviseur et conséquences	11
III.4.2	Fonctionnement du superviseur	12
III.4.3	Fonctionnement de l'estimateur d'impact	12
III.5	Vers une modélisation unifiée des deux dynamiques	12
III.5.1	Problème de complémentarité linéaire	12
III.5.2	Méthodes de résolution	12
IV	Mesures et observateurs	13
IV.1	Les différentes valeurs à observer	13
IV.2	Capteurs disponibles	13
IV.3	Méthodes de mesure et conséquences	13
IV.3.1	Mesure de la posture du robot	13
IV.3.2	Observation de la position de la base mobile	13
IV.3.3	Observation des vitesses et accélérations du robot et de la base	13
IV.3.4	Observation de l'angle de basculement et d'inclinaison du sol	13
IV.3.4.1	Observabilité	13
IV.3.4.2	Méthode d'observation	13
IV.3.4.3	Limites	13

V	Résultats et expérimentations	14
V.1	Schéma de contrôle en boucle fermée	15
V.2	Expériences en l'absence de perturbation et sur sol horizontal	15
V.2.1	Protocole expérimental	15
V.2.2	Analyse des expériences	15
V.2.3	L'importance du choix des pondérations	15
V.3	Expériences de compensation de perturbations	15
V.3.1	Protocole expérimental	15
V.3.2	Analyse des expériences	15
V.3.3	Les limites	15
V.4	Expériences de compensation de l'inclinaison du sol	15
V.4.1	Protocole expérimental	15
V.4.2	Analyse des expériences	15
V.4.3	Les limites	15
VI	Synthèse	16
VI.1	Contributions	16
VI.2	Perspectives	16
VI.3	conclusion	16
	Bibliographie	16
	Annexes	17
A	Pepper, un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles	18
B	Optimisation du choix du modèle dynamique	19
C	Résolution d'un problème quadratique	20
D	"MPC-WalkGen", librairie C++ implémentant la commande par modèle prédictif	21

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 Plateforme expérimentale

I.5 Contributions techniques

I.6 Organisation du document

Chapitre II

Modélisation du système

II.1 Choix du modèle et conséquences

- Choix d'un modèle dynamique rigide multi corps
- Compromis fidélité/compléxité et temps de calcul
- Choix du nombre de corps (lien vers anexe pour une optimisation des valeur).
- Phénomènes physiques non-pris en compte : Mécanique de contact roue/sol + jeu articulaire + élasticité hip roll + moments des différents sous corps rigide

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 contrôlabilité 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 $\zeta \geq 0$
- 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 retrouver 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

IV.2 Capteurs disponibles

IV.3 Méthodes de mesure et conséquences

IV.3.1 Mesure de la posture du robot

IV.3.2 Observation de la position de la base mobile

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

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

IV.3.4.1 Observabilité

IV.3.4.2 Méthode d'observation

IV.3.4.3 Limites

Chapitre V

Résultats et expérimentations

V.1 Schéma de contrôle en boucle fermée

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

V.2.1 Protocole expérimental

V.2.2 Analyse des expériences

V.2.3 L'importance du choix des pondérations

V.3 Expériences de compensation de perturbations

V.3.1 Protocole expérimental

V.3.2 Analyse des expériences

V.3.3 Les limites

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

V.4.1 Protocole expérimental

V.4.2 Analyse des expériences

V.4.3 Les limites

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**