

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	10
III.2	Outil mathématique et contraintes associées	10
III.2.1	Problématique	10
III.2.2	Principe de la programmation quadratique	10
III.2.3	Contraintes sur la formulation du problème d'optimisation	10
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	10
III.3.3.3	Problème quadratique résultant	10
III.3.4	Gestion de la transition entre les deux états	10
III.3.4.1	Problématique associée	10
III.3.4.2	Formulation des objectifs	10
III.3.4.3	Formulation des contraintes	10
III.3.4.4	Problème quadratique résultant	10
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	11
III.4.3	Fonctionnement de l'estimateur d'impact	11
III.5	Vers une modélisation unifiée des deux dynamiques	11
III.5.1	Problème de complémentarité linéaire	11
III.5.2	Méthodes de résolution	11
III.5.2.1	Programmation quadratique avec contraintes non-linéaires	11
III.5.2.2	Linéarisation par <i>a priori</i>	11
III.5.2.3	Conclusion	11
IV	Mesures et observateurs	12
IV.1	Les différentes valeurs à observer	12
IV.2	Capteurs disponibles	12
IV.3	Méthodes de mesure et conséquences	12
IV.3.1	Mesure de la posture du robot	12

IV.3.2	Observation de la position de la base mobile	12
IV.3.3	Observation des vitesses et accélérations du robot et de la base	12
IV.3.4	Observation de l'angle de basculement et d'inclinaison du sol	12
IV.3.4.1	Observabilité	12
IV.3.4.2	Méthode d'observation	12
IV.3.4.3	Limites	12
V	Résultats et expérimentations	13
V.1	Schéma de contrôle en boucle fermée	14
V.2	Expériences en l'absence de perturbation et sur sol horizontal	14
V.2.1	Protocole expérimental	14
V.2.2	Analyse des expériences	14
V.2.3	L'importance du choix des pondérations	14
V.3	Expériences de compensation de perturbations	14
V.3.1	Protocole expérimental	14
V.3.2	Analyse des expériences	14
V.3.3	Les limites	14
V.4	Expériences de compensation de l'inclinaison du sol	14
V.4.1	Protocole expérimental	14
V.4.2	Analyse des expériences	14
V.4.3	Les limites	14
VI	Synthèse	15
VI.1	Contributions	15
VI.2	Perspectives	15
VI.3	conclusion	15
	Bibliographie	15
	Annexes	16
A	Pepper, un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles	17
B	Optimisation du choix du modèle dynamique	18
C	Résolution d'un problème quadratique	19
D	"MPC-WalkGen", librairie C++ implémentant la commande par modèle prédictif	20

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 - ζ problème de complémentarité sur les forces de contact

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)
- 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

II.3.2 Choix de la dynamique d'extrapolation

II.3.3 Formulation du modèle prédictif

Chapitre III

Commande par modèle prédictif

III.1 Principe

III.2 Outil mathématique et contraintes associées

III.2.1 Problématique

III.2.2 Principe de la programmation quadratique

III.2.3 Contraintes sur la formulation du problème d'optimisation

III.3 Formulation des problèmes d'optimisations

III.3.1 Introduction

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

III.3.2.1 Formulation des objectifs

III.3.2.2 Formulation des contraintes

III.3.2.3 Problème quadratique résultant

III.3.3 Lorsque le robot bascule sur deux roues

III.3.3.1 Formulation des objectifs

III.3.3.2 Formulation des contraintes

III.3.3.3 Problème quadratique résultant

III.3.4 Gestion de la transition entre les deux états

III.3.4.1 Problématique associée

III.3.4.2 Formulation des objectifs

III.3.4.3 Formulation des contraintes

III.3.4.4 Problème quadratique résultant

III.4 Gestion des deux modèles dynamiques exclusifs

III.4.1 Choix d'un superviseur et conséquences

III.4.2 Fonctionnement du superviseur

III.4.3 Fonctionnement de l'estimateur d'impact

III.5 Vers une modélisation unifiée des deux dynamiques

III.5.1 Problème de complémentarité linéaire

III.5.2 Méthodes de résolution

III.5.2.1 Programmation quadratique avec contraintes non-linéaires

III.5.2.2 Linéarisation par *a priori*

III.5.2.3 Conclusion

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**