

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

<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>I Introduction</b>	<b>6</b>
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
<b>II Modélisation du système</b>	<b>7</b>
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

<b>III</b>	<b>Commande par modèle prédictif</b>	<b>9</b>
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
<b>IV</b>	<b>Mesures et observateurs</b>	<b>13</b>
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 . . . . .	14
IV.3.4	Observation de l'angle de basculement et d'inclinaison du sol . . . . .	14
<b>V</b>	<b>Résultats et expérimentations</b>	<b>15</b>
V.1	Schéma de contrôle en boucle fermée . . . . .	16
V.2	Expériences en l'absence de perturbation et sur sol horizontal . . . . .	16

V.2.1	Protocole expérimental . . . . .	16
V.2.2	Analyse des expériences . . . . .	16
V.2.3	L'importance du choix des pondérations . . . . .	16
V.3	Expériences de compensation de perturbations . . . . .	16
V.3.1	Protocole expérimental . . . . .	16
V.3.2	Analyse des expériences . . . . .	16
V.3.3	Les limites . . . . .	16
V.4	Expériences de compensation de l'inclinaison du sol . . . . .	16
V.4.1	Protocole expérimental . . . . .	16
V.4.2	Analyse des expériences . . . . .	16
V.4.3	Les limites . . . . .	16
<b>VI</b>	<b>Synthèse</b>	<b>17</b>
VI.1	Contributions . . . . .	17
VI.2	Perspectives . . . . .	17
VI.3	conclusion . . . . .	17
<b>Bibliographie</b>		<b>17</b>
<b>Annexes</b>		<b>18</b>
<b>A</b>	<b>Pepper, un robot humanoïde à roues omnidirectionnelles</b>	<b>19</b>
<b>B</b>	<b>Optimisation du choix du modèle dynamique</b>	<b>20</b>
<b>C</b>	<b>Résolution d'un problème quadratique</b>	<b>21</b>
<b>D</b>	<b>"MPC-WalkGen", librairie C++ implémentant la commande par modèle prédictif</b>	<b>22</b>

## **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**

- 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**

## **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**