

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDE
ESISAR 2004/2005

**Compensation de frottements sur un robot bipède
anthropomorphe**

Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
Rhône-Alpes

Zirst - 655 avenue de l'Europe - Montbonnot
38334 Saint Ismier Cedex - France

Charles POUSSOT-VASSAL

Dates du Stage	Du 01/02/2005 au 01/07/2005
Module d'approfondissement	ISC (AUTOMATIQUE)
Tuteurs Entreprise	Roger PISSARD-GIBOLLET / Pierre-Brice WIEBER
Tuteur Ecole	Eduardo MENDES

Remerciements

Je tiens à remercier Bernard Espiau, directeur de l'INRIA Rhône-Alpes, de m'avoir accueilli et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires au bon déroulement de mon projet de fin d'étude.

Je remercie également Roger Pissard-Gibollet et Pierre-Brice Wieber (mes responsables de stage à l'INRIA) ainsi qu'Eduardo Mendès (mon tuteur à l'ESISAR), qui m'ont suivi et encadré sur les aspects scientifiques, pratiques et expérimentaux avec une grande compétence. Je leur suis profondément reconnaissant pour leur aide, leurs conseils pertinents et leur confiance. Ils ont su me motiver et me conseiller tout au long du stage.

Je remercie également de manière générale toute l'équipe du SED et du projet BIPOP pour leur bonne humeur, leur gentillesse et leur accueil chaleureux.

Enfin, je remercie pour leur sympathie et leur bonne humeur mes compagnons de la halle robotique Mariam, Soraya, Albino et toute l'équipe de la coupe robotique E=M6.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	vii
Liste des figures	x
0 Introduction	1
0.1 Présentation de l'INRIA	1
0.1.1 L'Unité de Recherche Rhône-Alpes	1
0.1.2 Le projet BIPOP et le service SED	2
0.2 Cahier des charges	2
0.3 Organisation du travail	2
0.4 Pourquoi des robots marcheurs anthropomorphes?	3
0.5 État actuel des réalisations	4
0.6 Introduction à la marche et terminologie	5
I Étude théorique	7
1 Modélisation de BIP	9
1.1 Présentation de la plateforme expérimentale BIP	9
1.1.1 Structure mécanique	9
1.1.2 Les actionneurs (moteurs, variateurs, transmissions)	9
1.1.3 Remarque sur les frottements	10
1.1.4 Les capteurs	10
1.2 La modélisation géométrique	10
1.3 Modélisation de la dynamique... et des contacts	11
1.3.1 Modèle classique	11
1.3.2 Les bipèdes, une modélisation à part	11
1.4 Les bipèdes : des systèmes sous-actionnés	15

A	La plateforme BIP	17
A.1	Présentation	17
A.2	Procédure de mise en route	17
B	Un point sur les systèmes non-réguliers	19
2	La stabilité et la commande	21
2.1	Concepts de stabilité des bipèdes	21
2.2	Les trajectoires de référence	22
2.3	Lois de commande	23
2.3.1	Compensation des forces de contact	23
2.3.2	La commande PD et ses variantes	24
2.3.3	La commande Computed Torque	24
2.3.4	La commande par fonction de tâche d'un bipède	25
2.3.5	Méthodes adaptatives	27
C	Exemple de la fonction $Q(q)$	29
D	Commandes adaptatives	31
D.1	Adaptation basée sur la théorie de Lyapunov	31
D.2	Fonction de tâche adaptative	32
3	Le frottement	35
3.1	Introduction aux frottements	35
3.1.1	En général.	35
3.1.2	Dans le cadre des Bipèdes	35
3.2	Phénomènes dans les systèmes mécaniques	36
3.2.1	Frottement cinétique et Frottement statique	36
3.2.2	Frottement dynamique	36
3.2.3	Influence de la charge	38
3.3	Les modèles de frottement	38
3.3.1	Les modèles statiques	38
3.3.2	Les modèles dynamiques	41
3.4	Méthodes de compensation	43
3.5	Bilan et perspectives	46
3.5.1	Tour d'horizon bibliographique	46
3.5.2	Conclusion	47
3.5.3	Perspectives	48

II Réalisations pratiques et Résultats obtenus	49
4 Estimateur de vitesse	51
4.1 Problématique globale et cadre de l'étude	51
4.2 Mise en forme du problème	52
4.3 Réalisation pratique et implantation	52
4.4 Résultats et problèmes rencontrés	53
4.5 Conclusion	55
4.6 Perspectives	55
E Observateur de vitesse	57
E.1 Calcul des gains de l'observateur	57
E.2 Discrétisation de l'observateur	57
5 Estimateur de perturbations	59
5.1 Problématique globale et cadre de l'étude	59
5.2 Mise en forme du problème	60
5.3 Réalisation et implantation de l'observateur	61
5.3.1 Principe d'observation et de compensation	61
5.3.2 Réalisation	61
5.4 Résultats et problèmes rencontrés	62
5.4.1 Simulations	63
5.4.2 Réalisations expérimentales	63
5.5 Conclusion	68
5.6 Perspectives	68
F Observateur de perturbation	69
F.1 Etude de la commandabilité et de l'observabilité	69
F.2 Résultats des simulations Matlab/Simulink	70
Estimation financière	70
Conclusion	73
Références bibliographiques	77

Table des figures

1	Les bipèdes Johnnie, QRIO, HRP-2 et ASIMO	4
2	Cycle de marche	5
3	Plans servant à l'étude de la marche	5
1.1	Indexation de Khalil et Kleinfinger dans le cas de liaisons glissières et pivots .	10
1.2	Pied du robot entrant en contact avec le sol et cône d'Amontons-Coulomb . .	12
A.1	Le robot BIP debout / Parties de BIP / Une cheville de BIP (on voit les articulations munies de vis à rouleaux)	18
2.1	Polygone de sustentation	21
C.1	Quelques points caractéristiques de BIP	30
3.1	Effet Dahl; déformation et rupture de la jonction sous la contrainte de F (déplacement microscopique de l'ordre de $5\mu m$ pour le fer)	37
3.2	Illustration du Frictional Lag (fonction du signe de variation de vitesse)	37
3.3	Quelques modèles classiques. a) Frottement <i>Coulomb</i> b) Frottement Coulomb + <i>visqueux</i> c) Frottement Coulomb + visqueux + <i>statique</i> d) Frottement Coulomb + visqueux + statique + effet <i>Stribeck</i>	38
3.4	Interface entre deux surfaces en contact, au travers de l'aspect « brosse » et le modèle équivalent (similaire à un ressort + un coefficient d'amortissement) . .	42
3.5	Schéma de compensation par feedback suivant le modèle de LuGre	43
3.6	Effet linéarisant du Dither sur le frottement (ici de Coulomb)	44
3.7	PD + Reversed position error integral control	45
4.1	Comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse articulaire selon HuMAnS (noir) et selon notre observateur (bleu) sur l'articulation 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et 14 (lombaires)	53
4.2	Erreur introduite par la quantification des codeurs moteurs sur la position moteur, à gauche sur tous les moteurs, à droite sur le moteur 5 (cheville gauche interne)	53

4.3	Comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse articulaire selon HuMANs (noir) et selon notre observateur (bleu) sur l'articulation 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et zoom sur l'axe 2 (cheville droite interne) en utilisant les signaux quantifiés des codeurs moteurs	54
4.4	En haut : comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse de l'observateur classique (bleu) à celle de HuMANs (noir). En bas : comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse de l'observateur non linéaire (bleu) à celle de HuMANs (noir), sur les articulations 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et 14 (lombaires) .	54
4.5	A gauche la moyenne, à droite la variance de l'erreur de HuMANs (noir), observateur asymptotique (bleu) et observateur non linéaire (rouge) en fonction des articulations	55
5.1	Schéma de compensation et de régulation (contrôleur-estimateur en cascade) [33]	60
5.2	Schéma d'observation de perturbation (observateur en turquoise)	62
5.3	Système double intégrateur avec sa compensation de perturbation basée sur un estimateur discrétisé (sous Simulink)	63
5.4	De gauche à droite : force non modélisée estimée en fonction de la vitesse des moteurs pour les axes 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et zoom sur les boucles de l'axe 4 (cuisse droite)	64
5.5	De gauche à droite : en noir, comparaison de l'estimation statique (haut) et dynamique (bas) en fonction de la vitesse des moteurs sur les articulations 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et 8 (cuisse gauche) + Moindres carrés (rouge)	65
5.6	De gauche à droite : comparaison de l'estimation des perturbations statique (noir) et dynamique (bleu) en fonction du temps sur les articulations 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et 13 (bassin)	65
5.7	De gauche à droite : estimation dynamique des perturbations en fonction de la position moteur sur les articulations 3 (genou droit), 13 (bassin) et 5 (cheville gauche interne)	66
5.8	De gauche à droite : estimation dynamique des perturbations en ligne (bleu) et hors ligne (noir) en fonction de la position moteur sur les articulations 3 (genou droit), 13 (bassin) et 10 (hanche)	66
5.9	Suivi de trajectoire : trajectoire désirée (noir), trajectoire réalisée (rouge), erreur (vert) sur le genou. A gauche, sans compensation de frottement, à droite avec la compensation estimée. En bas, un zoom est fait pour mieux apprécier l'erreur.	67
F.1	Suivi de trajectoire sans perturbation	70
F.2	Suivi de trajectoire avec perturbation	71
F.3	Observation de la perturbation	71
F.4	Suivi de trajectoire avec un rebouclage de la perturbation estimée sur la commande	71

Chapitre 0

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'environnement dans lequel le stage s'est déroulé. Après avoir présenté l'objectif ainsi que le planning prévisionnel du projet, une introduction sur l'intérêt des robots marcheurs, les principes de la marche humaine et la terminologie employée est décrite afin de mieux comprendre les objectifs du stage.

0.1 Présentation de l'INRIA

L'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) est un organisme public à caractère scientifique et technologique qui mène des recherches avancées dans le domaine des sciences et technologies de l'information et de la communication. Ce domaine inclut l'informatique, l'automatique, les télécommunications, le multimédia, la robotique, le traitement du signal et le calcul scientifique. L'INRIA est placé sous la double tutelle du Ministère de la Recherche et du Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Son organisation décentralisée (6 unités de recherche dans toute la France) lui permet de collaborer avec de nombreuses universités, grandes écoles, organismes de recherche et entreprises.

Le budget total est de 123 M Euros HT (dont 22% de ressources propres). L'INRIA compte 400 chercheurs, 500 ingénieurs et techniciens, 750 post-doctorants, stagiaires et invités, 800 doctorants, 450 chercheurs et enseignants d'autres organismes, et 200 "ingénieurs experts" (sur contrat de recherche). De plus, quatre vingt sociétés sont issues de l'INRIA, parmi elles, Ilog, aujourd'hui cotée au Nasdaq. En 2004, l'INRIA disposait de 175 brevets actifs, 120 logiciels distribués en accès libre ou commercialisé [43].

0.1.1 L'Unité de Recherche Rhône-Alpes

L'unité regroupe 25 équipes de recherche (partenaires : CNRS, INPG, INSA, Claude Bernard, UJF et l'ENS de Lyon) pour 500 personnes. Ses activités sont organisées autour de cinq pôles : les systèmes communicants, cognitifs, symboliques, numériques et biologiques.

0.1.2 Le projet BIPOP et le service SED

Lors de mon stage j'ai été affecté sur un projet conjoint au projet BIPOP et au service SED.

Le projet BIPOP fait parti du pôle de recherche sur les systèmes numériques. La thématique de cette équipe est centrée autour des systèmes dynamiques non réguliers et de leur modélisation, leur commande ainsi que leur simulation numérique. Les domaines concernés sont entre autres : l'automobile, le spatial, le systèmes électro-mécaniques, la robotique (commande de robots marcheurs, jongleurs, sauteurs, coureurs...). Les problèmes ouverts sont encore très nombreux dans ce domaine, aussi bien au niveau théorique (commandabilité, observabilité, stabilisation...), que des aspects numériques et logiciels. Le robot bipède constitue l'application privilégiée du projet quant aux aspects commande. Un axe important de recherche concerne les applications biomédicales, en particulier la réhabilitation des paraplégiques par électrostimulation.

Le SED (Support Expérimentation et Développement logiciel) a pour mission de maintenir les installations (matériel et logiciels spécialisés), de développer des prototypes, de mettre en place des expérimentations et de participer aux recherches et expérimentations.

0.2 Cahier des charges

Un des axes de recherche du projet BIPOP est l'étude de la marche artificielle pour la robotique et la réhabilitation des personnes paraplégiques. Le robot BIP¹ est la plateforme expérimentale centrale pour tous ces travaux.

La loi de commande actuellement implémentée dans le robot BIP ne permet pas de réaliser une marche tridimensionnelle. Un des points difficiles concerne notamment la compensation des frottements dans les actionneurs du robot. Il est donc nécessaire de retravailler cette loi de commande. Cela commence par un affinage de ses réglages actuels, mais nécessite également des modifications plus profondes de sa structure, au moins en ce qui concerne la compensation de frottements. Le résultat attendu consiste donc en une amélioration notable du suivi des trajectoires de références.

L'objectif global de ce projet est d'améliorer la loi de commande existante afin de parvenir à réaliser une marche tridimensionnelle stable ; cela passe par une étude approfondie sur les frottements.

0.3 Organisation du travail

Le travail que j'ai effectué durant ce stage, d'une durée de cinq mois, s'organise en deux grandes parties : la partie théorique, et la partie pratique ou expérimentale. Le fait de réaliser une étude bibliographique relativement approfondie avant de commencer à réaliser des tests

¹Dont la mécanique a été imaginée et conçue par P. Sardain, du Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers.

expérimentaux permet de prendre du recul sur les choix scientifiques à faire. Le planning temporel s'est déroulé comme suit :

- **Etude théorique et bibliographique** : début février - début avril (10 semaines)
 - Prise en main du modèle du robot (modèle de contact...)
 - Prise en main des commandes (Proportionnel-Dérivé, Fonction de tâche...)
 - Prise en main de la plateforme BIP (utilisation, code C)
 - Etude des frottements (phénomènes, modèles, compensation)
 - Rédaction de documents sur le modèle de BIP, les commandes en robotique, les frottements et leurs compensations...
 - Présentations orales (sur le modèle, les commandes, le frottements)
- **Réalisations pratiques** (sur le simulateur et sur le robot) : avril - fin juin (11 semaines)
 - Réglage des gains du correcteur actuel sur BIP (robot suspendu, au sol)
 - Réglage des coefficients de frottements statiques
 - Simulation d'un observateur de vitesse sur HuMANs
 - Simulation d'un observateur de perturbation sous Simulink et le logiciel HuMANs (Scilab)
 - Réalisation des observateurs en C, et implantation sur le bipède
 - Tests sur la plateforme

Mes responsables me laissaient une grande liberté d'action dans l'étude bibliographique et dans l'expérimentation. Je présentais fréquemment, devant plusieurs personnes de mon service, les résultats bibliographiques et/ou expérimentaux.

0.4 Pourquoi des robots marcheurs anthropomorphes ?

Pour se déplacer, les robots à roues (ou à chenilles) doivent rester en contact quasi-permanent avec le sol alors que les robots marcheurs se contentent de *points d'appui ponctuels et momentanés*. C'est précisément cette caractéristique qui fait d'eux des robots idéalement conçus pour se déplacer dans les zones accidentées comme les forêts, les usines sinistrées ou pour franchir des obstacles. Plus particulièrement, les robots bipèdes anthropomorphes, de par leur géométrie, s'adaptent parfaitement à l'environnement conçu pour et par l'homme (escaliers, couloirs).

La particularité des robots bipèdes anthropomorphes, outre leur aspect plus sympathique et convivial, est qu'ils présentent l'intérêt de pouvoir être impliqués dans divers travaux :

- Activités de service et d'assistance
- Bio-mécanique (afin de mieux comprendre les principes de la marche humaine)
- Applications médicales (contribuer à la réhabilitation des personnes paraplégiques)

En plus des difficultés habituelles rencontrées lors de la réalisation d'un robot mobile (per-

ception de l'environnement, déplacement, manipulation d'objets...), les robots marcheurs, et plus spécifiquement bipèdes, posent des problèmes complexes comme : la stabilité (qui est remise en cause à chaque pas), la ponctuation du mouvement par des contacts (qui rend l'équilibre précaire), la génération de trajectoires (qui doit tenir compte des contraintes d'environnement)...

Le robot BIP est un support d'expérimentation scientifique pour la marche humaine. Il n'a pas pour vocation de devenir un robot permettant d'assister l'homme ou d'effectuer ses tâches quotidiennes. Il doit avant tout permettre de mieux comprendre les mécanismes de la locomotion et contribuer à terme à la réhabilitation des personnes handicapées.

0.5 État actuel des réalisations

Les robots marcheurs ont fait l'objet de nombreuses études et depuis quelques années, les réalisations en matière de bipèdes antropomorphes se sont multipliées. Cependant seuls quelques projets atteignent un degré de maturité suffisant, tant au niveau mécanique qu'au niveau des lois de commande.

Parmi ces projets, on distingue les réalisations de l'Institute of Applied Mechanics avec son robot Johnnie [39], de SONY avec QRIO [40], de Kawada Industries avec HRP-2 [41] et de HONDA avec ASIMO [42] qui est sûrement le plus abouti de tous (figure 1)².



FIG. 1 – Les bipèdes Johnnie, QRIO, HRP-2 et ASIMO

Il est à noter que bien que certains projets affichent des résultats impressionnants, les modèles et commandes utilisés sont plus que simplifiés.

²de gauche à droite

0.6 Introduction à la marche et terminologie

La marche est un mode de déplacement durant lequel le sujet a toujours un pied d'appui ou un contact avec le sol (contrairement à la course où le sujet peut se trouver dans une phase sans support). Il en découle donc une alternance de phases de *simple support* (un pied au sol) et de *double support* (deux pieds au sol). On appelle cette alternance le *cycle de marche* (figure 2).

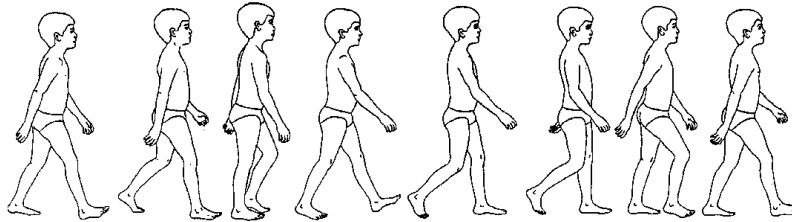


FIG. 2 – Cycle de marche

On distingue la *marche statique*, pendant laquelle l'équilibre est maintenu en permanence, et la *marche dynamique*, qui est une suite de déséquilibres avant rattrapés. Chez l'homme la marche dynamique est choisie en situation normale alors que l'on optera pour la marche statique en situation délicate (terrain glissant ou accidenté).

On peut décomposer le mouvement de la marche suivant trois plans différents de l'espace, *sagittal*, *frontal* et *horizontal* (figure 3). Le mouvement principal a lieu dans le plan sagittal, mais de nombreux mouvements comme le déhanchement, le mouvement du bassin ou la position des pieds, apparaissent au niveau des autres plans. Ces derniers ne sont pas à négliger car ils améliorent la fluidité, l'absorption des chocs et la stabilité du robot.

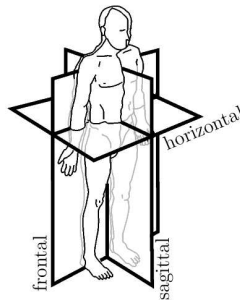


FIG. 3 – Plans servant à l'étude de la marche

Dans la première partie, nous étudions théoriquement le modèle, les commandes et les frottements sur BIP ; puis, dans la seconde, nous présentons le travail réalisé sur le bipède.

Première partie
Étude théorique

Chapitre 1

Modélisation de BIP

Didier Georges, dans [16], écrit que les robots mobiles constituent une *sous-famille des robots articulés* nécessitant une approche méthodologique particulière. Dans ce chapitre nous présentons le modèle utilisé à l'INRIA pour caractériser les robots bipèdes (et plus particulièrement BIP) en mettant en avant les singularités qui les constituent et en introduisant les concepts fondamentaux de *forces de contact*, *impacts* et *contraintes unilatérales*.

1.1 Présentation de la plateforme expérimentale BIP

Le robot BIP (figure A.1 et Annexe A) a été conjointement conçu par le Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) de Poitiers et l'INRIA Rhône-Alpes.

1.1.1 Structure mécanique

BIP est un robot bipède à mécanique rigide comprenant 21 degrés de liberté (ddl). En effet, il compte 15 articulations (6 dans chaque jambe et 3 entre le bassin et le tronc) auxquelles il faut ajouter 6 variables afin de préciser la position et l'orientation d'un de ses solides. Les dimensions et masses des membres inférieurs ont été conçues de manière à conserver les tailles et proportions de l'homme. BIP mesure 180cm et pèse 106kg.

1.1.2 Les actionneurs (moteurs, variateurs, transmissions)

Les 15 articulations sont actionnées électriquement par des moteurs brushless pilotés par des variateurs qui assurent les fonctions d'asservissement en couple, de gestion de la puissance et les fonctions de sécurité. Chaque moteur est équipé d'un codeur qui permet de donner la position angulaire relative du rotor. BIP possède 5 articulations équipées de réducteurs Harmonic-Drive (transmission du mouvement linéaire) et 10 articulations équipées de vis à rouleaux et de biellettes (transmission du mouvement non-linéaire).

Remarque : Dans le simulateur et sur BIP, nous devons sans cesse reconstituer les positions des coordonnées articulaires. Pour cela il nous faut inverser les fonctions introduites par les systèmes de transmissions. Pour l'ensemble vis à rouleaux / biellettes, l'inversion est analytiquement impossible. Elle donc faite numériquement puis codée dans une table.

1.1.3 Remarque sur les frottements

Les mécanismes de transmission présentés ci-dessus transmettent les couples désirés sur les articulations. Ce sont ces parties de BIP qui sont le plus affectées par les frottements. Ces phénomènes feront l'objet d'une étude plus particulière par la suite.

1.1.4 Les capteurs

On retrouve trois capteurs d'efforts placés sous chaque pied qui permettent de connaître la composante normale (verticale) de la force de réaction du support, les deux composantes du moment de cette force dans le plan horizontal et la position du centre de pression. BIP est également doté de quatre jauges de contraintes sur chacune de ses chevilles, et de potentiomètres au pelvis et aux genoux.

1.2 La modélisation géométrique

Afin de pouvoir décrire à tout instant la position et l'orientation de tous les solides qui composent BIP (à partir d'un seul solide), il nous faut établir un modèle géométrique. On utilise la notation de Khalil et Kleinfinger qui est une modification de la méthode de Denavit et Hartenberg, car elle est plus appropriée à la modélisation des robots à chaîne fermée, comme par exemple ceux ayant plus d'un contact avec le sol (ce qui est le cas de BIP, et des robots bipèdes en général). Le formalisme de Khalil et Kleinfinger décrit le passage du repère $i - 1$ au repère i de la façon suivante (figure 1.1) :

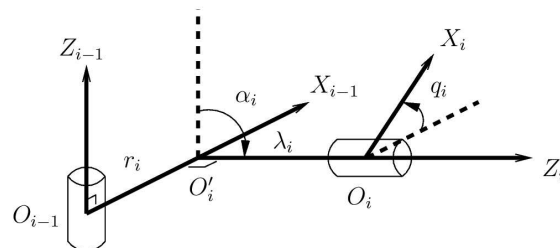


FIG. 1.1 – Indexation de Khalil et Kleinfinger dans le cas de liaisons glissières et pivots

Chaque solide i est muni d'un repère (O_i, X_i, Y_i, Z_i) . La représentation de Khalil et Kleinfinger pour une chaîne de n segments est donnée par une liste de vecteurs de la forme $(r_i, \lambda_i, \alpha_i, q_i)_{i=1..n}$.

Ainsi, la matrice H qui permet de passer du repère $i - 1$ au repère i , et par laquelle on peut reconstituer la posture et l'orientation de BIP à tous moments est donnée par :

$$H_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 & r_i \\ \cos \alpha_i \sin q_i & \cos \alpha_i \cos q_i & -\sin \alpha_i & -\lambda_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin q_i & \sin \alpha_i \cos q_i & \cos \alpha_i & \lambda_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

1.3 Modélisation de la dynamique... et des contacts

1.3.1 Modèle classique

Le modèle dynamique des systèmes électro-hydro-mécaniques peut être écrit sous la forme classique du modèle Lagrangien en utilisant la formulation d'Euler-Lagrange comme suit :

$$\begin{aligned} M(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) \dot{q} &= -G(q) + T(q) u \\ \dim(q) &= n \end{aligned} \quad (1.2)$$

Avec $M(q)$, une matrice symétrique définie positive ($n \times n$) représentant l'inertie du système, $N(q, \dot{q})$, une matrice ($n \times n$) qui rassemble les effets non-linéaires, centrifuges et de Coriolis et $G(q)$, un vecteur ($n \times 1$) qui représente le vecteur gravité du système. Les efforts généralisés sont modélisés par $T(q) u$, où $T(q)$ est la matrice ($n \times n$) représentant les caractéristiques électro-mécaniques des actionneurs (moteurs et transmissions) et u , le vecteur ($n \times 1$) de consigne envoyé aux moteurs. On note q le vecteur des coordonnées généralisées (avec \dot{q} et \ddot{q} respectivement les vitesses et accélérations de ce vecteur).

Dans le cas de BIP, $n = 21$ et le vecteur q décrit d'une part la posture de BIP ($q_1 \dots q_{15}$) par les positions articulaires des actionneurs et d'autre part la position et l'orientation de l'un de ces solides ($q_{16} \dots q_{21}$), ce qui permet de déduire la position et l'orientation du robot complet dans son environnement.

1.3.2 Les bipèdes, une modélisation à part

Nous l'avons vu, pour se déplacer, les robots bipèdes, prennent des points d'appuis éparés et momentanés. Le contact avec le sol est donc un élément central des mouvements des robots marcheurs. En effet, la marche est définie comme une suite de prise et de perte de contacts. Malheureusement, la simple formulation Lagrangienne donnée par (1.3) ne modélise pas ces contacts avec l'environnement. Ainsi, l'équation (1.3) décrit l'évolution du système libre, c'est à dire, lorsque celui-ci n'est soumis à aucune contrainte (autre que la gravité).

Pour décrire l'évolution du système lorsque l'une des contraintes est active, on introduit des multiplicateurs de Lagrange dans la dynamique du système [6] (qui devient alors une dynamique contrainte). Afin de restituer ce phénomène complexe, il faut alors compléter l'équation précédente et introduire un modèle de contact.

Pour cela, nous utilisons le modèle de contact développé par Pierre-Brice Wieber dans [37], car c'est également le modèle qui a été implanté sur le robot BIP et le simulateur HuMAnS-1.0 (qui modélise la plateforme BIP). Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- non-pénétration, c'est à dire que les solides qui composent le robot doivent toujours avoir une altitude supérieure ou égale à celle du sol
- non-glissement, c'est à dire que les forces de contact restent à l'intérieur du cône de frottement défini par Amontons-Coulomb (figure 1.2).

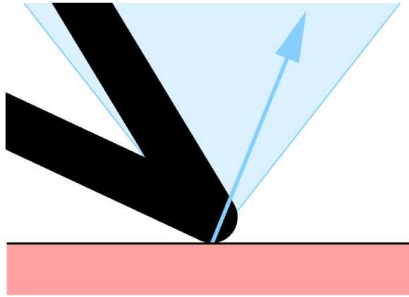


FIG. 1.2 – Pied du robot entrant en contact avec le sol et cône d'Amontons-Coulomb

La non-pénétration

Le fait que les solides qui composent le robot doivent toujours se situer à une altitude supérieure ou égale à celle du robot se traduit par : $\varphi_n(q) \geq 0$. Où φ_n décrit l'ensemble des points du robot. On note φ_n^* l'ensemble des points du robot qui sont en contact avec le sol, autrement dit l'ensemble des contraintes actives à l'instant t . On peut alors écrire la relation suivante :

$$\varphi_n^*(q) = 0 \quad (1.3)$$

Afin de s'assurer que ces points ne pénètrent pas dans le sol à l'instant t , on impose, lorsque le pied est durablement en contact avec le sol, une vitesse nulle et une accélération positive ou nulle (qui traduit que le pied ne pénètre pas, mais peut décoller). D'où :

$$C_n(q) \dot{q} = 0 \quad (1.4)$$

$$C_n(q) \ddot{q} + s_n(q, \dot{q}) \geq 0 \quad (1.5)$$

Où $C_n(q) = \partial\varphi_n^*/\partial q$ représente la matrice jacobienne de φ_n^* et $s_n(q, \dot{q})$ les effets non-linéaires introduits par la dérivation. Les équations (1.4) et (1.5) imposent bien le fait que les points posés sur le sol ne peuvent plus descendre, mais peuvent remonter à tout instant. Cela justifie leur nom de *contraintes unilatérales*.

Le non-glissement

Lorsqu'un bipède entre en contact avec le sol, il se peut qu'il glisse. Mais les forces de contact entrent alors en jeu et s'y opposent. Dans notre cas, on fait l'hypothèse que celui-ci ne glisse jamais. Ainsi, de la même façon que dans le paragraphe précédent, on peut exprimer les positions de ces points comme :

$$\varphi_t^*(q) = 0 \quad (1.6)$$

Avec φ_t^* qui désigne les contraintes de non-glissement à l'instant t . Il en découle un ensemble de contraintes sur la vitesse et l'accélération du système :

$$C_t(q) \dot{q} = 0 \quad (1.7)$$

$$C_t(q) \ddot{q} + s_t(q, \dot{q}) = 0 \quad (1.8)$$

Où $C_t(q) = \partial\varphi_t^*/\partial q$ est le jacobien des contraintes de non-glissement et $s_t(q, \dot{q})$ les effets non-linéaire de la dérivation. Les équations (1.7) et (1.8) mettent quand à elles en avant les *contraintes de non-glissement*, qui sont dans notre cas des *contraintes bilatérales*.

Principe de complémentarité

Pour modéliser les forces de contact, nous avons introduit des multiplicateurs de Lagrange λ tel que : $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_n \\ \lambda_t \end{bmatrix}$. Les indices n et t désignent une contrainte respectivement normale et tangentielle.

Etant donné que λ_n représente les forces de contact normales, on peut imposer la contrainte $\lambda_n \geq 0$ (la réaction du sol n'agissant que dans un sens). Cela nous permet alors d'introduire le *concept de complémentarité* : lorsqu'un contact avec le sol k se rompt, l'inégalité (1.5) devient :

$$C_{n_k}(q) \ddot{q} + s_{n_k}(q, \dot{q}) > 0 \quad (1.9)$$

Dans ce cas il n'y a donc plus force de contact au point k (i.e. $\lambda_{nk} = 0$), d'où, la condition suivante (qui est la condition de complémentarité proprement dite) :

$$\lambda_n^T [C_n(q) \ddot{q} + s_n(q, \dot{q})] = 0 \quad (1.10)$$

$$\text{Avec } \lambda_n > 0 \text{ et } C_n(q) \ddot{q} + s_n(q, \dot{q}) > 0 \quad (1.11)$$

Cette condition exprime le fait qu'on ne peut avoir de force de contact que s'il y a contact.

Cône de frottement

D'après le modèle de frottement d'Amonton-Coulomb, lorsqu'un contact entre deux objets est soumis à une force normale f_n , la force de frottement f_t ne peut prendre ses valeurs que dans le cône de frottement. Ainsi, on introduit une inégalité (1.12) qui impose aux forces de contact de rester dans le cône de frottement, ce qui garantit la contrainte de non-glissement (figure 1.2) :

$$\| f_t \| \leq \mu_0 f_n \quad (1.12)$$

Le modèle résultant

Des hypothèses et conditions précédentes, on peut reformuler la dynamique en adjoignant les contraintes de la façon suivante :

$$M(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = T(q) u + C(q)^T \lambda \quad (1.13)$$

$$C_n(q) \ddot{q} + s_n(q, \dot{q}) \geq 0 \quad (1.14)$$

$$C_t(q) \ddot{q} + s_t(q, \dot{q}) = 0 \quad (1.15)$$

$$\mathcal{A}(\lambda) \geq 0 \quad (1.16)$$

Avec $C(q) = \begin{bmatrix} C_n(q) \\ C_t(q) \end{bmatrix}$ et $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_n \\ \lambda_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{t1} \\ \lambda_n \\ \lambda_{t2} \end{bmatrix}$, qui peut être mis sous la forme : $\begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix}$, et $\mathcal{A}(\lambda)$ regroupant les inégalités précédentes (1.10) et (1.12).

A présent, la dynamique (1.13) fait intervenir les multiplicateurs de Lagrange λ_n et λ_t qui traduisent l'amplitude des efforts introduits par les contraintes de non-pénétration et de non-glissement. Les forces de contact normales (qui s'opposent à toutes pénétration) et tangentielles (qui s'opposent aux glissements) sont retrouvées au travers des équations dynamiques (1.14) et (1.15). L'ensemble des équations (1.13)-(1.16) permet alors de modéliser l'évolution du système en *régime libre* et en *régime contraint*.

Pour être idéale, la modélisation devrait en plus introduire une *loi de choc* pour modéliser la transition de ces deux régimes et les *impacts* qui caractérisent les *systèmes non-réguliers* (c.f. Annexe B). Mais ceci n'a pas été jugé utile dans le cadre de cette étude car on fait l'hypothèse que la trajectoire de référence générée impose bien une vitesse nulle au moment des prises de contact de sorte qu'il n'y a pas d'impact, c'est à dire que ces derniers sont pris en compte par la trajectoire elle même.

1.4 Les bipèdes : des systèmes sous-actionnés

Tous les systèmes pilotés (et les robots bipèdes n'échappent pas à la règle) sont constitués d'un ensemble d'actionneurs et de systèmes de transmission afin de produire les couples désirés sur les articulations. Comme nous l'avons décrit dans les chapitres précédents, le vecteur q permet de représenter à chaque instant la position et la posture du robot.

Ici, nous allons dissocier les positions articulaires (état des actionneurs) des positions indiquant l'orientation de BIP. En effet, seules les positions articulaires peuvent être directement pilotées par les actionneurs, c'est à dire qu'on ne peut appliquer de couple que sur une partie seulement de q . Ainsi, nous considérerons de manière séparée q_1 (décrivant les positions articulaires pilotées, ou nombre d'actionneurs) et q_2 (décrivant les positions et orientations d'un des solides) de la façon suivante :

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{actionneurs} \\ \text{position et orientation} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Pour BIP, dim } q_1 &= 15 \\ \text{et dim } q_2 &= 6 \end{aligned}$$

De cette notation (1.17), nous pouvons reformuler l'équation dynamique en faisant apparaître l'ensemble des couples sur chacune des articulations :

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} + C(q)^T \lambda \quad (1.18)$$

$$\dim q_1 = \dim \tau \quad (1.19)$$

Cette mise en équation (1.18) permet de mettre en avant un point important : les actionneurs agissent uniquement sur une partie du robot. Il est alors possible de découper selon le même schéma que celui des moteurs chacun des éléments de la dynamique pour obtenir :

$$\begin{bmatrix} M_1(q) \\ M_2(q) \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} N_1(q, \dot{q}) \\ N_2(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q)^T \\ C_2(q)^T \end{bmatrix} \lambda \quad (1.20)$$

Cette représentation mathématique montre bien que c'est uniquement par les forces de contact que le robot peut être en mesure de se déplacer. C'est pourquoi, dès lors qu'un robot bipède possède un point d'appui, chacun de ses mouvements articulaires est en mesure de provoquer un changement de posture. Un robot bipède peut donc être vu comme un *système sous-actionné et contraint* (dépendant de son environnement).

Maintenant que nous avons introduit le modèle, nous allons aborder le problème de la commande et de la stabilité.

Annexe A

La plateforme BIP

A.1 Présentation

La plateforme se décompose en trois grandes parties (figure A.1) :

- La partie mobile qui compte :
 - La mécanique (pieds, chevilles, tibias, genoux, cuisses, hanches, pelvis)
 - Les actionneurs (moteurs brushless, réducteurs et axes de transmission)
 - Des capteurs (jauge de contraintes, butées électrique, codeurs)
- L’armoire électrique, fixée sur le pelvis et qui fait office de tronc, qui compte :
 - Un rack de puissance (alimenté en triphasé) et 15 variateurs pour moteurs brushless (Parvex)
 - Une carte de sécurité (reliée avec les capteurs de la partie mobile) et une carte de liaison ethernet PowerPC (Kriek)
 - Une carte contenant des convertisseurs A/N et N/A
- Un PC (Akila, fonctionnant sous Linux Temps Reel) qui réalise la commande (algorithme, et génération de trajectoire) la communication ethernet avec le robot

A.2 Procédure de mise en route

- Mise en route électrique :
 - Enclencher l’arrêt d’urgence (bouton rouge)
 - Mettre l’armoire électrique et l’alimentation triphasée sous tension
- Mise en route et initialisation mécanique :
 - BIP ne connaît pas sa position articulaire absolue, on a donc besoin de le mettre à zéro avant chaque début de série de manipulations ; pour cela, on positionne les engrenages de façon à aligner les repères blanc et on place les genoux en butées

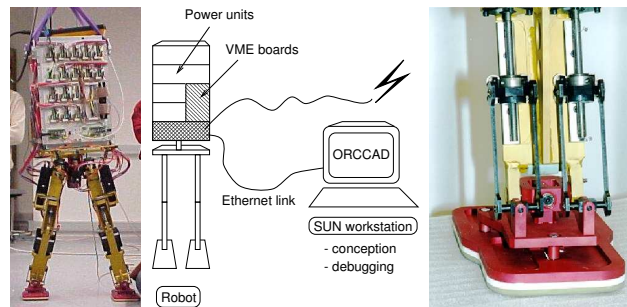


FIG. A.1 – Le robot BIP debout / Parties de BIP / Une cheville de BIP (on voit les articulations munies de vis à rouleaux)

- Mise sous puissance et vérification par les LEDs que tout est bien lancé (vérification des erreurs)
 - Tant que la puissance du robot n'est pas active :
 - LED verte clignote, LED rouge VAR est éteinte
 - Quand la puissance est active :
 - LED verte s'éteint, LED rouge VAR s'allume
 - Lorsqu'une erreur survient, la puissance se désactive et la cause d'erreur est affichée (1 seule cause d'erreur peut être activée à la fois) en face avant sur les LED 8-7-6-5
 - 0001 : causé par un Inhibit logiciel
 - 0010 : causé par la Puissance moteur
 - 0100 : causé par l'Arrêt d'urgence
 - 1001 : causé par la Limite électrique du pelvis
 - 1010 : causé par la Limite électrique de la jambe droite
 - 1100 : causé par la Limite électrique de la jambe gauche
 - Une fois l'erreur corrigée, il faut ré-activer la puissance par le logiciel en exécutant `bipResetInhibit()`
- Se connecter au robot (kriek) :
 - Se connecter au robot : `telnet kriek` (Login : root, Password : (aucun))
- Lancer l'expérimentation (JoinControl par exemple) :
 - Se connecter sur Akila : `telnet akila`
 - Aller dans `cd BIP_SOFT/Session/JointControl`
 - Puis lancer `./bipJointControl.sh`
 - Se placer dans la fenêtre de kriek et exécuter : `ProcControl`
 - Ensuite donner le nom de la trajectoire à jouer (`nomDeTrajectoire.traj`)
 - Sélectionner le mode manuel et attendre que l'initialisation du robot soit faite
 - Enlever les genoux les butées et enlever l'arrêt d'urgence

Annexe B

Un point sur les systèmes non-réguliers

La classe des systèmes dynamiques non-réguliers contient tous les systèmes présentant des sauts, ou une non-différentiabilité dans leurs états (impacts, réinitialisation de leurs états). Par exemple, une bille qui rebondit, un circuit électrique comportant des diodes idéales, un système hybride (qui bascule d'une commande à l'autre).

Les systèmes non-réguliers peuvent être vus en quelque sorte comme un *mélange de systèmes continus et discrets*, fonction de l'influence ou non des contraintes. L'étude de ces systèmes constitue à ce jour un domaine de recherche très actif et assez nouveau, notamment ce qui concerne l'étude des systèmes dynamiques Lagrangiens non-réguliers, qui requiert par exemple de mettre au point de nouveaux outils d'analyse de la stabilité (Lyapunov n'étant valable que pour les systèmes continus dans le temps). A l'INRIA, des travaux menés par Sophie Chareyron et Pierre-Brice Wieber, qui ont déjà aboutis notamment sur des modifications du théorème de Lyapunov pour ce type de système, sont en actuellement cours [8].

Le robot bipède BIP fait parti de cette classe de systèmes. En effet, il présente une interaction avec son environnement et peut donc être vu comme un système mécanique soumis à des discontinuités [6]. Pour notre étude, nous ne développerons pas d'avantage cet aspect, mais il est important de le garder à l'esprit.

Chapitre 2

La stabilité et la commande

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la notion de *stabilité* telle qu'elle a été définie pour BIP, et de présenter à partir du modèle développé dans le chapitre précédent, quelques principes de *commandes* utilisés et utilisables sur un robot bipède.

2.1 Concepts de stabilité des bipèdes

Cette section introduit quelques notions, pour aboutir à une définition convenable de la stabilité d'un bipède et les conditions à respecter pour l'assurer. On appelle *polygone de sustentation* l'enveloppe contenant tous les points de contact du bipède avec le sol (figure 2.1).

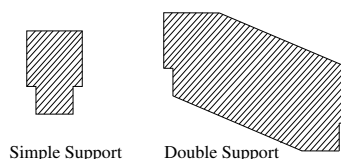


FIG. 2.1 – Polygone de sustentation

Un bipède est dit *statiquement stable* si la projection de son centre de gravité (CDG) reste constamment à l'intérieur du polygone de sustentation. Dans ce cas, sa stabilité est assurée à chaque instant de son déplacement.

En revanche, la marche d'un bipède est dite *dynamiquement stable* lorsque la trajectoire suivie est constituée d'une succession de mouvements en déséquilibre menant à une marche stable (c'est à dire sans chute). A cette démarche, on associe souvent le critère du ZMP (Zéro Moment Point). Le ZMP est défini comme le centre de pression de la somme des forces de contact. Si ce point reste à l'intérieur du polygone de sustentation alors la démarche est dite dynamiquement stable.

Malheureusement, ce simple critère de stabilité n'est pas suffisant car il ne prend pas en compte les contraintes de non glissement. De plus, le polygone de sustentation (base du critère ZMP) n'est valide que si les pieds sont dans un même plan, ce qui n'est pas le cas lorsque le robot monte un escalier ou évolue sur un sol non plat.

Pour notre étude, nous utiliserons l'approche proposée par Pierre-Brice Wieber dans [37], qui se base sur la notion de mouvement réalisable. En effet, nous avons vu qu'un robot ne peut se déplacer qu'en prenant appui sur le sol. Ainsi, si tous les mouvements de la première partie de la dynamique (1.20) peuvent être réalisés sans peine en faisant varier les couples moteurs (on s'affranchit des limites des transmissions), les mouvements de la seconde partie sont, quand à eux, plus limités car imposés par les contraintes (modélisés par les multiplicateurs de Lagrange). En l'absence de contraintes, aucun mouvement de cette seconde partie n'est donc possible. S'il existe des forces de contact vérifiant les équations (1.16) et (1.20) pour un couple articulaire τ donné à l'instant t , alors on dira que le *mouvement est réalisable*.

Si on considère une trajectoire de marche qui fixe $q(t)$, $\dot{q}(t)$ et $\ddot{q}(t)$ de telle façon qu'à chaque instant cette trajectoire soit réalisable, au sens défini ci-dessus, alors le mouvement global sera réalisable. C'est ainsi que l'on considèrera la stabilité d'une trajectoire et donc du bipède. La mise en œuvre d'une démarche anthropomorphe fait alors intervenir deux notions :

- La génération de *trajectoires de référence réalisables*
- La *loi de commande* qui permettra de suivre ce mouvement réalisable à tout instant

2.2 Les trajectoires de référence

Définir une trajectoire de référence, c'est donner l'évolution du vecteur q des coordonnées généralisées en fonction du temps. C'est précisément cette trajectoire qui doit assurer les contraintes de stabilité énoncées précédemment.

Il n'existe pas de méthode absolue pour générer ces trajectoires, il faut se baser sur l'observation de l'homme. En pratique, la génération de trajectoire se fait en fixant des points clés (comme par exemple vitesses et accélérations nulles au moment de la pose du pied, position du pelvis, du CDG...), puis interpolant par un polynôme afin de restituer une trajectoire continue (qui est stable selon nos critères).

Pour assurer une démarche stable, le seul objectif est de stabiliser asymptotiquement une trajectoire de référence stable. Si le robot est suffisamment proche de cette trajectoire alors sa stabilité générale sera assurée.

2.3 Lois de commande

L'objectif d'une loi de commande est de stabiliser asymptotiquement, ou de poursuivre une trajectoire de référence. Dans notre cas, cette trajectoire de référence est supposée satisfaire les contraintes énoncées précédemment (non-pénétration et non-glissement) et garantir la stabilité du bipède. Dans cette partie nous allons faire un tour d'horizon des principales commandes employées en robotique et sur BIP. Ensuite, nous proposerons une approche adaptative en vue d'intégrer un modèle de frottement. Les commandes suivantes sont basées sur le modèle dynamique défini par (1.13).

2.3.1 Compensation des forces de contact

Par rapport aux systèmes électro-hydro-mécaniques classiques, le modèle des robots marcheurs intègre un terme caractérisant les forces de contact avec le sol. Ce terme $(C(q)^T \lambda)$, sur la plateforme BIP, est compensé simplement, tout comme on compense la gravité (à la différence près que les forces de contact doivent sans cesse être calculées car celles-ci changent régulièrement).

Lorsque le bipède entre en contact avec le sol à l'instant t , on a alors $C_n(q) \ddot{q} + s_n(q, \dot{q}) = 0$ et $\lambda \neq 0$ (principe de complémentarité), on peut donc pré-calculer les forces de contact λ présentes à cet instant à partir de l'équation (1.20) de la façon suivante :

$$\begin{cases} M_1(q) \ddot{q} + N_1(q, \dot{q}) \dot{q} + G_1(q) &= C_1(q)^T \lambda + \tau \\ M_2(q) \ddot{q} + N_2(q, \dot{q}) \dot{q} + G_2(q) &= C_2(q)^T \lambda \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \lambda &= C_2(q)^{-T} (M_2(q) \ddot{q} + N_2(q, \dot{q}) \dot{q} + G_2(q)) \\ \tau &= M_1(q) \ddot{q} + N_1(q, \dot{q}) \dot{q} + G_1(q) - \underbrace{C_1^T(q) C_2(q)^{-T} (M_2(q) \ddot{q} + N_2(q, \dot{q}) \dot{q} + G_2(q))}_{\lambda} \end{cases} \quad (2.2)$$

Ainsi, grâce à la seconde équation de (1.20), nous calculons les λ qui vérifient la dynamique de la position et posture du robot, puis nous ré-injectons ce coefficient dans la première partie de façon à ensuite produire les couples moteurs qui vont satisfaire la dynamique contrainte.

Il est important de noter que le calcul des forces de contact se fait en se basant uniquement sur le modèle, et que l'on suppose que le résultat est correct. Pour l'instant aucun retour d'effort n'est fait. Cela sera certainement l'une des prochaines étapes de BIP.

Les commandes que l'on va développer seront écrites en tenant compte de cette compensation. C'est à dire que l'on écrira la loi de commande non pas sous la forme $u = \dots$ mais sous la forme $u + C(q)^T \lambda = \dots$, en supposant que λ est connu grâce à (2.2), afin de ne pas oublier la présence de la *pré-compensation des contacts* (caractéristique des bipèdes).

2.3.2 La commande PD et ses variantes

Le contrôleur PD

Il s'agit d'appliquer au système la commande :

$$u + C(q)^T \lambda = -K_p (q - q_d) - K_v \dot{q} \quad (2.3)$$

Où K_p et K_v sont les matrices de gain (généralement diagonales, définies positives). Notons $e = q - q_d$, l'erreur de régulation, on obtient alors l'équation du système en boucle fermée suivante : $M(q)\ddot{e} + N(q, \dot{e})\dot{e} + G(e + q_d) + K_p e + K_v \dot{e} = 0$.

Avec, $e = q - q_d$, $\dot{e} = \dot{q}$ et $\ddot{e} = \ddot{q}$. Ce système a un point d'équilibre unique $e, \dot{e} = 0$, solution de $K_p e + G(e + q_d) = 0$ si et seulement si on choisit K_p suffisamment grand. Avec cette commande, il subsiste donc une erreur de traînage (dûe à la gravité) qui peut être négligée en augmentant K_p , au risque d'augmenter la sensibilité aux perturbations et de saturer les "actionneurs". Ici, il est important de remarquer que lorsque l'on parle de saturation des "actionneurs" il ne s'agit pas que de la saturation des moteurs, mais aussi et surtout de celle des forces de contact (la commande étant " $u + C(q)^T \lambda$ " et non " u ").

Pour éliminer cette erreur statique, on pense donc naturellement à introduire un terme de correction intégral. Dans [16], Didier Georges montre que l'ajout de ce terme conduit à prendre des risques de saturation des "actionneurs". Au delà du fait de saturer les moteurs, on risque de provoquer une chute du robot (car les forces de contact seraient alors incorrectes et le robot pourrait très bien basculer en arrière).

La commande PD et Compensation de gravité

Une solution à ce problème d'erreur de traînage due à la gravité, consiste à la compenser par un terme constant de la façon suivante :

$$u + C(q)^T \lambda = -K_p (q - q_d) - K_v \dot{q} + G(q) \quad (2.4)$$

L'erreur de régulation devient alors : $M(q)\ddot{e} + N(q, \dot{e})\dot{e} + K_p e + K_v \dot{e} = 0$.

On obtient ainsi une solution d'équilibre unique $e, \dot{e} = 0$. L'ajout du terme de compensation de gravité nous a permis de supprimer l'erreur de traînage, mais cela n'est pas suffisant pour réaliser une poursuite de trajectoire (c'est à dire, maîtriser les transitoires).

2.3.3 La commande Computed Torque

Objectif

L'idée est de *compenser toutes les non-linéarités de la dynamique du modèle* pour obtenir un système linéaire découplé au niveau des articulations puis d'appliquer un schéma de commande linéaire qui nous permettra de contrôler les transitoires.

Principe

On applique à l'entrée du système la loi de pré-compensation suivante :

$$u + C(q)^T \lambda = M(q) v + N(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \quad (2.5)$$

Le système bouclé devient alors $\ddot{q} = v$ (système double intégrateur linéaire découplé). Si on choisit maintenant $v = \ddot{q}_d - K_v (\dot{q} - \dot{q}_d) - K_p (q - q_d)$, toujours avec K_p et K_v des matrices diagonales définies positives, le système bouclé devient : $\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0$.

Ce système est asymptotiquement stable (pour $K_p > 0$ et $K_v > 0$). Ainsi, la loi de commande définie par (2.6) est asymptotiquement stable et assure la poursuite de trajectoire.

$$\begin{cases} u + C(q)^T \lambda = M(q) v + N(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \\ v = \ddot{q}_d - K_v (\dot{q} - \dot{q}_d) - K_p (q - q_d) \end{cases} \quad (2.6)$$

De cette façon, la dynamique de ralliement de la consigne peut être fixée arbitrairement (par K_p et K_v), mais cela implique de connaître relativement bien le système. Nous verrons par la suite que les imprécisions du modèle peuvent être compensées en utilisant une loi de commande non-linéaire de type adaptative.

2.3.4 La commande par fonction de tâche d'un bipède

Objectif

L'objectif de la commande par fonction de tâche (qui n'est autre que la transposition de la Computed Torque dans l'espace de la tâche) est de transposer l'espace articulaire q vers un espace dit "de la tâche" X afin de pouvoir générer des trajectoires plus simplement et surtout, dans le cas du robot bipède, afin de *pouvoir imposer des contraintes sur certaines parties du système*. Par exemple, cela permet de définir une trajectoire de marche confortable en découplant les mouvements des pieds (pour qu'ils satisfassent les contraintes de non-glissement et de non-pénétration) des mouvements du reste du robot sans se soucier des genoux, hanches...

Principe

L'idée est d'exprimer le modèle dynamique du bipède dans l'espace de la tâche. Pour cela, on introduit un changement de variable $Q(q)$ qui nous permet de passer de l'espace articulaire à l'espace de la tâche et dans lequel on veut faire apparaître les contraintes de contacts. On définit donc :

$$X = Q(q)$$

$$\dot{X} = \dot{Q}(q) = \frac{\partial Q(q)}{\partial q} \dot{q} = \frac{\partial Q(q)}{\partial t} \dot{q} = J(q) \dot{q} \quad (2.7)$$

$$\ddot{X} = \ddot{Q}(q) = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} = J(q) \ddot{q} + s(q, \dot{q}) \quad (2.8)$$

Avec $J(q)$ la jacobienne de $Q(q)$ et $\dim X = \dim q$. On suppose que le changement de variable $Q(q)$ constitue un difféomorphisme de classe C^2 entre un ensemble Ω et son image $Q(\Omega)$. C'est à dire que toutes les propriétés valables dans un ensemble le seront dans l'autre, ainsi on ne fait que transposer le problème dans un autre ensemble plus "convivial" pour notre travail.

Remarque : le nouvel espace de travail doit être un espace de même dimension que celui de la tâche pour pouvoir entièrement découpler les articulations. En Annexe C, un exemple de fonction $Q(q)$ implanté sur BIP est présenté.

D'après (2.7) et (2.8), on peut ré-écrire le modèle dynamique dans l'espace de la tâche :

$$\begin{cases} u + C(q)^T \lambda = M'(q) \ddot{X} + N'(q, \dot{q}) \dot{X} + G'(q) \\ M'(q) = M(q) J(q)^{-1} \\ N'(q) = N(q) J(q)^{-1} - M(q) J(q)^{-1} \dot{J}(q) J^{-1}(q) \\ G'(q) = G(q) \end{cases} \quad (2.9)$$

Remarque : Le système doit être de classe C^1 et $J(q)$ doit être inversible. C'est une condition qui est toujours vérifiée dans le simulateur et dans le contrôleur de BIP.

A présent, on peut réaliser le même type de commande que pour le Computed Torque en introduisant la précompensation et la commande (2.10), obtenant ainsi le comportement découplé du système en boucle fermée : $\ddot{X} = v$.

$$\begin{cases} u + C(q)^T \lambda = M'(q) v + N'(q, \dot{q}) \dot{X} + G'(q) \\ v = \ddot{X}_d - K_v (\dot{X} - \dot{X}_d) - K_p (X - X_d) \end{cases} \quad (2.10)$$

Toujours avec les matrices diagonales $K_p > 0$ et $K_v > 0$. Ainsi, on assure une poursuite de trajectoire asymptotiquement stable, un système bouclé linéaire et découplé dans l'espace de la tâche. La dynamique de poursuite est fixée par K_p et K_v .

Conditions sur $Q(q)$, particularité des bipèdes

Comme expliqué précédemment, on souhaite que le changement de variable fasse apparaître les contraintes de contact actives, c'est à dire les $\varphi_n^*(q)$ et $\varphi_t^*(q)$ (définis dans le chapitre 1). L'erreur de suivi de trajectoire, après changement de base vaut :

$$\begin{aligned} e(q, t) &= Q(q) - Q(q_d) \\ \dot{e}(q, \dot{q}, t) &= J(q) \dot{q} - \dot{Q}(q_d) \\ \ddot{e}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) &= J(q) \ddot{q} + s(q, \dot{q}) - \ddot{Q}(q_d) \end{aligned} \quad (2.11)$$

On note par l'indice d les trajectoires désirées. De plus, on note $e_{n,t}(q, t)$ la partie de cette erreur qui concerne les éléments en contact avec le sol. On suppose alors qu'après prise de

contact, nous avons :

$$\begin{aligned} e_{n,t}(q, t) &= \varphi_{n,t}^*(q) - \varphi_{n,t}^*(q_d) = 0 \\ \dot{e}_{n,t}(q, \dot{q}, t) &= C_{n,t}(q) \dot{q} - C_{n,t}(q_d) \dot{q}_d = 0 \end{aligned}$$

Sous ces conditions, assurer que le contact avec le sol est conforme avec celui imposé par la trajectoire de référence, revient à assurer :

$$\ddot{e}_{n,t}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = 0 \quad (2.12)$$

Retour à la commande

A partir des équations de (2.9), et en utilisant (2.11), l'équation dynamique du système peut alors être mise sous la forme :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} + C(q)^T \lambda &= M(q) J^{-1}(q) [\ddot{e}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) - s(q, \dot{q}) + \ddot{Q}(q_d)] + N(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \\ &= M'(q) [v - s(q, \dot{q})] + N'(q, \dot{q}) \dot{X} + G'(q) \end{aligned} \quad (2.13)$$

A présent, il nous faut assurer que les éléments du vecteur v qui correspondent à $\ddot{e}_{n,t}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t)$ soient nuls pour vérifier la condition (2.12). Le vecteur v vérifiant ces conditions est alors modifié, c'est pourquoi nous le désignerons à présent par v_* .

2.3.5 Méthodes adaptatives

Les schémas de commande exposés précédemment ne tiennent pas compte des variations des paramètres qui composent le modèle et supposent que ce dernier est bien connu (dynamique haute fréquence, paramètres statique et dynamiques, frottements...). Ainsi, s'il n'est pas complet ou si ces paramètres sont mal connus et/ou varient au cours du temps, la performance de la commande peut se voir dégrader. Il peut être alors utile de mettre en place une *loi d'adaptation*. Il existe plusieurs stratégies de commandes adaptatives [3] ; en Annexe D, nous traitons l'exemple de celle qui s'appuie sur la technique d'adaptation directe basée sur une fonction de Lyapunov, puis nous adaptons cette approche à la fonction de tâche exposée précédemment. Les résultats obtenus par ces schémas de commande pourront être utilisés sur BIP pour compenser les forces de frottements (nous verrons comment dans le chapitre 3).

On rappelle que les problèmes de stabilité du robot en présence de prise et de pertes de contact restent les mêmes. Tant que le robot peut réaliser la loi de commande, c'est à dire, tant que le robot a les forces de contact adéquates, la stabilité asymptotique de la trajectoire de référence est assurée ce qui assure l'équilibre global du robot.

Dans le cas où les forces de contact font défaut, le robot n'est plus à même de réaliser la commande. Dans ce cas là, Pierre-Brice Wieber propose de changer de trajectoire de référence (c.f. [37]).

Annexe C

Exemple de la fonction $Q(q)$

La loi de commande par *fonction de tâche* présentée dans le chapitre 2 introduit un changement de base $Q(q)$ qui doit faire apparaître les contraintes de contact active $\varphi^*(q)$ et permettre de découpler les pieds du reste du robot.

Le tableau C.1 présente un exemple de changement de variables (implanté sur BIP) à partir de la position de quelques points caractéristiques donnés en (figure C.1).

Les éléments $Q_{4...6}$ et $Q_{13...15}$ de ce changement de variables représentent la position et l'orientation du pied droit qui participent aux contraintes de contact actives lorsque que celui-ci est posé à plat. Il en va de même pour pour le pied gauche avec $Q_{7...9}$ et $Q_{16...18}$. Ainsi, ces 12 éléments nous permettent de satisfaire les contraintes de contact. $Q_{7...9}$ et $Q_{10...12}$, quand à eux, définissent la position du CDG et l'orientation du tronc. Ces éléments nous permettent de définir une marche stable. Enfin, les éléments $Q_{19...21}$ de ce changement de variable ne sont pas justifié par une utilité, ils auraient tout aussi bien pu être remplacés par une tâche secondaire.

$Q_{1...3}$	$\{x_G, y_G, z_G\}$	position du centre de masse du robot
$Q_{4...6}$	$\{x_5, y_5, z_5\}$	position de la cheville droite
$Q_{7...9}$	$\{x_{10}, y_{10}, z_{10}\}$	position de la cheville gauche
$Q_{10...12}$	$\{y_{17} - y_{16}, x_{17} - x_{16}, x_{18} - x_{16}\}$	orientation du tronc
$Q_{13...15}$	$\{y_1 - y_2, x_1 - x_2, y_4 - y_2\}$	orientation du pied droit
$Q_{16...18}$	$\{y_{11} - y_{12}, x_{11} - x_{12}, y_{14} - y_{12}\}$	orientation du pied gauche
$Q_{19...21}$	$q_{13...15}$	

TAB. C.1 – Définition d'un changement de variables pour la fonction de tâche

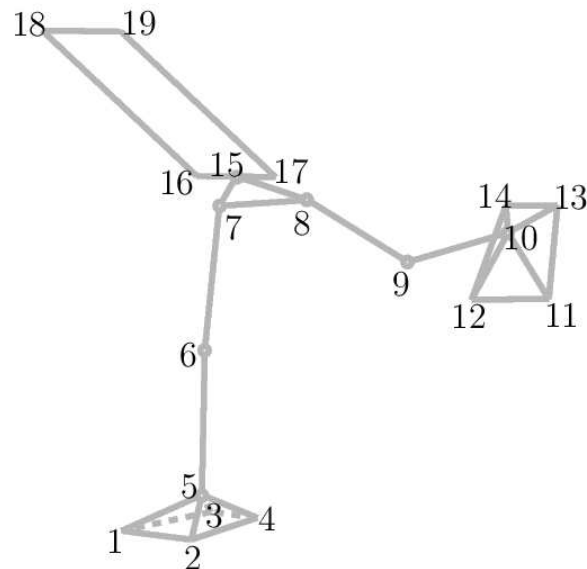


FIG. C.1 – Quelques points caractéristiques de BIP

Annexe D

Commandes adaptatives

D.1 Adaptation basée sur la théorie de Lyapunov

Considérons la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(t) = \frac{1}{2} (\dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \tilde{q}^T K_p \tilde{q} + \tilde{p}^T \Gamma \tilde{p}) \quad (\text{D.14})$$

Avec p , un vecteur contenant les paramètres réels, \hat{p} , le vecteur des paramètres estimés et $\tilde{p} = p - \hat{p}$, l'erreur d'estimation paramétrique. Soit q , les coordonnées généralisées, $\tilde{q} = q - q_d$, l'erreur de poursuite. De plus, K_p et Γ sont des matrices diagonales, symétriques et définies positives.

On dérive la candidate (D.14) par rapport au temps et on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\tilde{q}}^T \underbrace{M(q) \ddot{\tilde{q}}}_{M(q) \ddot{q} - M(q) \ddot{q}_d} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T \dot{M}(q) \dot{\tilde{q}} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} + \tilde{p}^T \Gamma \dot{\tilde{p}} \\ &= \dot{\tilde{q}}^T \underbrace{(u + C^T \lambda - N \dot{q} - G - M \ddot{q}_d)}_{M(q) \ddot{q}} + \dot{\tilde{q}}^T \left(\frac{1}{2} (\dot{M} - 2N) + N \right) \dot{\tilde{q}} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} + \tilde{p}^T \Gamma \dot{\tilde{p}} \\ &= \dot{\tilde{q}}^T (u + C^T \lambda - M \ddot{q}_d - N \dot{q}_d - G + K_p \tilde{q}) + \tilde{p}^T \Gamma \dot{\tilde{p}} \end{aligned}$$

Avec $\dot{M} - 2N = 0$ (propriété d'anti-symétrie).

Donc, si on choisi la loi de commande suivante :

$$u + C(q)^T \lambda = \hat{M}(q) \ddot{q}_d + \hat{N}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \hat{G}(q) - K_p \tilde{q} - K_v \dot{\tilde{q}} \quad (\text{D.15})$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}(q) &= \hat{M}(q) - M(q) \\ \tilde{N}(q, \dot{q}) &= \hat{N}(q) - N(q) \\ \tilde{G}(q) &= \hat{G}(q) - G(q) \end{aligned}$$

Et en admettant que le système est linéaire en suivant ces paramètres (on peut donc noter $\tilde{M}(q) \ddot{q}_d + \tilde{N}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \tilde{G}(q) = Y(q, \dot{q}_d, \ddot{q}_d) \tilde{p}$), on a alors :

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T K_v \dot{\tilde{q}} + \tilde{p}^T (\Gamma \dot{\tilde{p}} + Y^T \dot{\tilde{q}}) \quad (\text{D.16})$$

Donc si on considère que p varie très lentement, on peut choisir la loi d'adaptation telle que $\Gamma \dot{\tilde{p}} + Y^T \dot{\tilde{q}} = 0$, c'est à dire :

$$\begin{aligned} -\dot{\tilde{p}} = \dot{\tilde{p}} &= -\Gamma^{-1} Y^T \dot{\tilde{q}} \\ \dot{\tilde{p}} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{D.17})$$

Avec Γ , représentant les gains d'adaptation. Et avoir finalement,

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T K_v \dot{\tilde{q}} \leq 0 \quad (\text{D.18})$$

Ainsi, la loi de commande (D.15) associée à la loi d'adaptation paramétrique (D.17) assure la stabilité selon Lyapunov. Donc le système se comporte de façon globalement stable.

Mais cette stabilité n'est assurée que pour $\dot{\tilde{q}}$; donc l'erreur en vitesse sera nulle, mais pas forcément celle en position. Cela peut être corrigé en modifiant légèrement la loi de commande proposée (cf. [16]).

D.2 Fonction de tâche adaptative

Dans la méthode présentée ci-dessus, on assure une erreur en vitesse nulle, mais pas en position. Dans cette approche, nous allons assurer la convergence en vitesse et en position. Pour cela, on se base sur la fonction de tâche développée précédemment dans le chapitre 2.

On notera \hat{a} , l'estimée de a , $\tilde{A} = A - \hat{A}$, l'erreur d'estimation sur A . En partant de la commande par fonction de tâche exprimée par (2.10), on peut écrire (en faisant apparaître l'erreur d'estimation) :

$$\begin{aligned} \hat{M}'(q) (\ddot{X}_d - K_v \dot{e} - K_p e) + \hat{N}'(q, \dot{q}) &= M'(q) \ddot{X} + N'(q, \dot{q}) \\ \Leftrightarrow -\ddot{e} - K_v \dot{e} - K_p e &= \hat{M}'^{-1}(q) [(N'(q, \dot{q}) - \hat{N}'(q, \dot{q})) + (M'(q) - \hat{M}'(q)) \ddot{X}] \end{aligned}$$

Si on note $M'(q) \ddot{X} + N'(q, \dot{q}) = \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) p$, avec p le vecteur paramètre, on peut alors réécrire l'équation précédente de la façon suivante :

$$\begin{aligned} -\ddot{e} - K_v \dot{e} - K_p e &= \hat{M}'^{-1}(q) [\Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) p - \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{p}] \\ &= \hat{M}'^{-1}(q) \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{p} \end{aligned} \quad (\text{D.19})$$

On peut maintenant mettre (D.19) sous la forme d'état suivante :

$$\dot{x} = A x + B \hat{M}'^{-1}(q) \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{p} \quad (\text{D.20})$$

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0_n \\ -I_n \end{bmatrix} \quad (\text{D.21})$$

On cherche à présent à stabiliser ce nouveau système, c'est à dire, faire tendre l'état x vers 0 en fixant des contraintes. Pour cela, nous choisissons la candidate de Lyapunov la plus évidente, qui fait intervenir l'erreur de suivi de trajectoire et l'erreur d'estimation :

$$\begin{cases} V = x^T P x + \tilde{p}^T \Gamma \tilde{p} \\ A^T P + P A = -F \end{cases} \quad (\text{D.22})$$

Avec $\Gamma > 0$, une matrice diagonale qui contient les gains d'adaptation, P , l'unique matrice définie positive solution de la seconde partie de (D.22), et $F > 0$ diagonale. Lorsqu'on dérive V par rapport au temps, on obtient :

$$\dot{V} = -x^T F x + 2\tilde{p}[\Phi^T(q, \dot{q}, \ddot{q}) \hat{M}'^{-1}(q) B^T P x + \Gamma \dot{\tilde{p}}] \quad (\text{D.23})$$

Donc, si on choisi la loi d'adaptation :

$$\dot{\tilde{p}} = -\hat{p} = -\Gamma^{-1} \Phi^T(q, \dot{q}, \ddot{q}) \hat{M}'^{-1}(q) B^T P x \quad (\text{D.24})$$

La fonction \dot{V} devient :

$$\dot{V} = -x^T F x \leq 0 \quad (\text{D.25})$$

Donc x tend vers 0 quand t tend vers l'infini. Comme x est le vecteur d'état composé de e et \dot{e} , on peut assurer que $e \rightarrow 0$ et $\dot{e} \rightarrow 0$. La commande par fonction de tâche adjointe à la loi d'adaptation (D.24) est donc asymptotiquement stable.

Remarque : Cela impose deux conditions,

- \ddot{X} accessible à la mesure
- \hat{M}' doit être inversible (matrice qui varie au cours du temps, donc il faut être capable de vérifier cela en ligne)

Le vecteur des paramètres p peut contenir n'importe quels paramètres du modèle. On pourra donc lui attribuer les paramètres de notre choix (par exemple ceux d'un modèle de frottement).

Chapitre 3

Le frottement

Dans ce chapitre nous introduirons la notion de *frottement* et les *phénomènes* qui le compose dans le cas des *systèmes mécaniques*, puis, nous ferons un état de l'art sur les principaux *modèles* de frottements existant à ce jour. Enfin, nous étudierons quelques techniques qui permettent de les *compenser* afin d'aboutir sur une stratégie de compensation pour BIP.

3.1 Introduction aux frottements

3.1.1 En général...

Le frottement est la *force de réaction tangentielle de sens opposé à la vitesse relative qui se crée entre deux surfaces en contact*. Il est omniprésent et inévitable dans tous les systèmes mécaniques où il y a un mouvement relatif d'une partie par rapport à une autre. Ce phénomène hautement non-linéaire et asymétrique, qui peut être responsable *d'erreurs de suivi, d'erreurs statiques* et de *cycles limites*, font des frottements un problème complexe à modéliser. Aujourd'hui encore le frottement est un sujet de recherche actif où plusieurs théories s'affrontent et où aucune solution unique ne s'est encore véritablement imposée comme pleinement satisfaisante tant au niveau de la modélisation que de la compensation.

3.1.2 Dans le cadre des Bipèdes

Philippe Sardain¹ et Gabriel Abba ont écrit dans [13] qu' « *une particularité des robots à pattes réside dans l'alternance de phases de support et de balancement, caractérisées par de petites vitesses et de fortes charges pour la première, grandes vitesses et faibles charges pour la seconde. Cette alternance entre deux modes de fonctionnement rend la commande très sensible aux effets de frottement* ».

¹Concepteur de la mécanique de BIP

Les commandes présentées dans le chapitre 2 génèrent les consignes en couple aux moteurs qui composent le robot. Les actionneurs, qui sont en fait des sous-systèmes mécaniques (ou mini-robots) du bipède, sont alors sujets aux effets du frottement. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons aux frottements dans le but d'améliorer le suivi de trajectoire du robot BIP pour aboutir à une marche expérimentale stable [4], [20], [37]. Nous nous intéresserons donc aux problèmes de frottements qui surviennent au niveau des actionneurs des robots, c'est à dire, au niveau des moteurs, des éléments de réduction de vitesse (engrenages, systèmes vis...), et des éléments de liaison (roulements ou paliers lisses).

3.2 Phénomènes dans les systèmes mécaniques

3.2.1 Frottement cinétique et Frottement statique

Le *frottement cinétique* est une force dont la valeur est fonction de la charge supportée (dans la littérature, elle est souvent considérée constante), indépendante de la vitesse de déplacement relative des surfaces en contact, et opposée au sens de cette vitesse.

Le *frottement statique*² est la force nécessaire pour commencer un mouvement à partir d'une vitesse nulle. Le frottement statique est la force de frottement quand le système est dit collé, c'est à dire, lorsque le système ne se déplace pas (vitesse nulle).

On appelle *force de rupture*, la force qui permet de faire la transition de la vitesse nulle (frottement statique) à une vitesse non nulle (frottement cinétique). Tant que l'on applique une force extérieure inférieure à la force de rupture, le système reste collé. Dès que l'on atteint cette force de rupture, le système se met en mouvement, on dit alors qu'il glisse, et le frottement devient un *frottement dynamique*. Ce phénomène est connu sous le nom de *stick-slip motion* [17], [23], [30].

Expérimentalement on a trouvé que la valeur de la force de rupture dépendait du taux de variation de la force extérieure appliquée. Plus ce taux est élevé, moins la force de rupture l'est, et réciproquement.

3.2.2 Frottement dynamique

Effet Dahl

L'effet Dahl, également connu sous le nom de *pré-glisement*, représente les petits glissements qui s'effectuent dans la zone collée. En effet, lorsqu'un système est collé (avant la rupture), des faibles déplacements peuvent avoir lieu. Ce phénomène physique est lié à la rigidité du mécanisme (c.f. caractéristique de la courbe pression-tension³ dans [14]). Dans

²Static friction ou Sticktion

³Stress-strain curve

la représentation décrite dans [17] et [19], le comportement de ces faibles déplacements est comparé à celui de ressorts dont le coefficient de raideur est égal à la rigidité du contact qui lie les deux parties (figure 3.1).

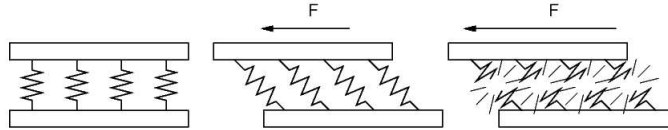


FIG. 3.1 – Effet Dahl; déformation et rupture de la jonction sous la contrainte de F (déplacement microscopique de l'ordre de $5\mu m$ pour le fer)

Effet Stribeck

L'effet Stribeck prend en compte le fait que dans la zone de faibles vitesses, les forces de frottements diminuent quand la vitesse augmente [11], [17]. Ce phénomène est lié au collage et à la force de rupture. En effet, pour créer un mouvement (à partir d'une vitesse nulle), il faut fournir une force plus importante que la force de frottement statique. Ainsi, une fois le mouvement créé (système décollé), la force de frottement diminue. Dans la section suivante, ce propos sera illustré au travers des modèles et de la figure 3.3 - d.

Effet hystérésis

Des tests durant lesquels la vitesse variait périodiquement autour d'une valeur de façon à ce que celle-ci soit toujours du même signe, ont permis de mettre en avant l'effet hystérésis des frottements. En effet, comme le montre la figure 3.2, la force de frottement est moins importante lorsqu'on diminue la vitesse que lorsqu'on l'augmente. Ce phénomène correspond à un retard pur et c'est pourquoi il est également nommé, *retard de frottement*⁴ [11], [17].

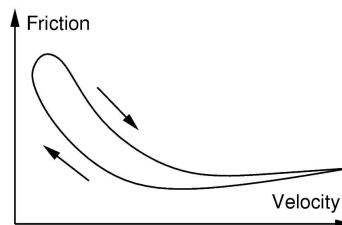


FIG. 3.2 – Illustration du Frictional Lag (fonction du signe de variation de vitesse)

⁴Frictional lag

Frottement visqueux

C'est la composante du frottement dynamique directement proportionnelle à la vitesse relative de déplacement des corps en contact (augmente linéairement avec la vitesse, et est nulle à vitesse nulle). Les modèles de frottement de base ajoutent cette composante à la force statique (nous verrons plus précisément comment dans la section suivante).

3.2.3 Influence de la charge

Un autre phénomène, rarement abordé dans la littérature, concerne l'*influence de la charge*. En effet, la force normale appliquée sur le système à déplacer est importante, plus les frottements le sont. Cette influence est un point sur lequel nous reviendrons par la suite car dans la plupart des cas, la charge influence d'avantage le frottement que la vitesse [13].

3.3 Les modèles de frottement

Dans cette section nous allons présenter quelques-uns des principaux *modèles, statiques et dynamiques*, existant à ce jour ([14], [15], [17], [44]).

3.3.1 Les modèles statiques

Les *modèles statiques*, également appelés *modèles classiques* décrivent la force de frottement en fonction de la vitesse, $F = F(\dot{q}) = F(v)$. Ces modèles sont, de par leur simplicité, les plus souvent employés. Ici, nous donnons une vue d'ensemble de ces modèles. Ils sont composés de termes qui modélisent chacun un des phénomènes de frottement exposé précédemment.

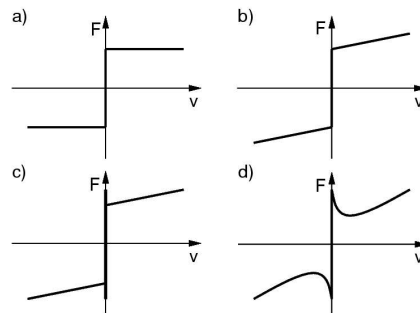


FIG. 3.3 – Quelques modèles classiques. a) Frottement *Coulomb* b) Frottement *Coulomb + visqueux* c) Frottement *Coulomb + visqueux + statique* d) Frottement *Coulomb + visqueux + statique + effet Stribeck*

Modèle de Coulomb

C'est le modèle de frottement de la forme la plus simple (figure 3.3 - a). Il est appelé frottement cinétique car il définit le frottement pour des vitesses non-nulles tel que :

$$\begin{cases} F & = F_{Coulomb} \\ F_{Coulomb} & = F_C \operatorname{sgn}(v) \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec $F_C = cste$, le paramètre de frottement de Coulomb. A vitesse nulle, ce modèle ne précise pas la valeur du frottement, elle se situe entre $-F_C$ et $+F_C$, et dépend de la façon dont est définie la fonction $\operatorname{sgn}(\cdot)$. Ce modèle est un relais parfait.

Modèle visqueux

Au modèle de Coulomb, on ajoute souvent les frottements visqueux $F_{Visqueux}$. On définit le frottement résultant généralement comme suit (figure 3.3 - b) :

$$\begin{cases} F & = F_{Coulomb} + F_{Visqueux} \\ F_{Visqueux} & = F_V v \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec $F_V = cste$, le paramètre de frottement visqueux. En réalité, ce terme a un comportement non-linéaire, d'où l'écriture générale suivante (Avec γ_v , un coefficient qui dépend de la géométrie et qui peut être 1/3, 2/3 ou 1) :

$$F_{Visqueux} = F_V |v|^{\gamma_v} \operatorname{sgn}(v) \quad (3.3)$$

Modèle de Sticktion

L'effet de *collé-glissé* ou *stick-slip* (figure 3.3 - c) est modélisé en introduisant une condition qui fait intervenir la force extérieure appliquée F_{ext} . Ainsi, en notant F_S le frottement statique, on peut écrire le modèle de sticktion, fonction de v et F_{ext} , de la façon suivante :

$$F = \begin{cases} F_{ext} & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_{ext}| < F_S \\ F_S \operatorname{sgn}(F_{ext}) & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_{ext}| \geq F_S \\ F = F_{Coulomb} + F_{Visqueux} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Remarque : à vitesse nulle, la force de frottement est maintenant fonction de F_{ext} .

Modèle de Stribeck

Pour compléter ces modèles statiques, on modifie (3.4) afin de prendre en compte l'effet Stribeck. On a alors :

$$F = \begin{cases} F_{ext} & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_{ext}| < F_S \\ F_S \operatorname{sgn}(F_{ext}) & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_{ext}| \geq F_S \\ F = F(v) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec $F(v)$ une fonction représentée sur la figure 3.3 - d. Une représentation classique de cette fonction, que l'on retrouve dans de nombreux articles [11], [13]... , est donnée par :

$$F(v) = F_{Coulomb} + F_{Visqueux} + (F_S - F_C) \exp(-|v/v_{stribek}|^{\gamma_{stribek}}) \operatorname{sgn}(v) \quad (3.6)$$

Avec $v_{stribek}$, la vitesse de Stribeck (faible vitesse)
 $\gamma_{stribek}$, qui influence la pente de l'effet Stribeck

Commentaire sur la l'influence de la charge

Souvent, dans la littérature scientifique, les modèles de frottements sont présentés avec l'hypothèse de fonctionnement sous *charge constante*. Les modèles classiques sont souvent présentés comme une représentation statique de la force en fonction de la vitesse, or, cette considération n'est conforme à la réalité que dans certains cas simples (moteur électrique par exemple). Bien des systèmes fonctionnent sous *charges variables*, et c'est le cas des robots bipèdes. Donc, le frottement dépend à la fois de la vitesse et de la charge : $F = F(v, \Gamma)$. On modifie alors le modèle (3.6) de façon à le rendre dépendant de la charge :

$$F(v, \Gamma) = \left[F_{Coulomb} + F_{Visqueux} + (F_S - F_C) e^{-|v/v_{stribek}|^{\gamma_{stribek}}} \operatorname{sgn}(v) \right] \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \quad (3.7)$$

Avec Γ proportionnel à la force normale F_N et Γ_0 , la charge à vide.

Problèmes des modèles statiques

Les modèles statiques posent problème de par leur dépendance à la *détection de vitesses faibles et/ou nulles* (qui reste un point complexe). De plus, étant donné qu'ils ne modélisent pas tous les phénomènes de frottements (pré-glissement, variation de force de rupture et retard de frottement), leurs performances sont diminuées, notamment pour les faibles vitesses.

Malgré les efforts d'Armstrong-Hélouvry [17], qui proposent de commuter entre un modèle pour la phase collée et un modèle pour la phase de glissement, ou de Karnopp, qui propose de définir une zone pour les très faibles vitesses où la force de frottement est nulle (au risque de ne plus bien accrocher avec les vrais phénomènes de frottements), les recherches s'orientent vers une modélisation dynamique des frottements...

3.3.2 Les modèles dynamiques

Le modèle devient dynamique à partir du moment où l'on introduit un état représentant le niveau de frottement. Ici, nous allons présenter quelques-uns des principaux modèles dynamiques.

Modèle de Dahl

Il est à la base des modèles de frottements dynamiques et est basé sur la courbe pression-tension (c.f. effet Dahl). C'est le premier modèle qui décrit l'aspect "ressort" du frottement dans la zone de collage. Il est défini par :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{\sigma}{F_C} |v| z + v \\ F(z, \dot{q}) &= \sigma z + F_{Visqueux} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Avec F_C , le coefficient de Coulomb, et σ , le coefficient de rigidité des ressorts. Ce modèle prend en compte le pré-glisement, l'effet hystérésis, le frottement de Coulomb et Visqueux, mais *ni l'effet Stribeck, ni le frottement statique*.

Modèle Bliman - Sorine

Le modèle (famille de modèles) de Bliman - Sorine est une *généralisation de celui proposé par Dahl* en (3.8). Il est basé sur le fait que la force frottement n'est pas fonction de la vitesse mais de plutôt de la distance parcourue après le passage à zéro. Le frottement peut alors être écrit sous la forme $F = F(s, \text{sgn}(v))$, de la façon suivante :

$$s = \int_0^t |v(\tau)| d\tau, \text{ et } \begin{cases} \dot{x}_s = A x_s + B v_s \\ F = C x_s \end{cases} \quad (3.9)$$

Avec $v_s = \text{sgn}(v)$, et x_s , le vecteur d'état de s . A partir de cette structure, Bliman et Sorine ont exploré des modèles de complexité différente :

$$\text{Premier ordre : } A = -1/\epsilon_f, B = f_1/\epsilon_f \text{ et } C = 1$$

Ce modèle, ne caractérise pas le pic des frottements statiques. En revanche, ceci peut être modélisé en introduisant un modèle du second ordre.

$$\text{Second ordre : } A = \begin{bmatrix} -1/\eta \epsilon_f & 0 \\ 0 & -1/\epsilon_f \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} f_1/\eta \epsilon_f \\ -f_2/\epsilon_f \end{bmatrix}, \text{ et } C = [1 \quad 1]$$

Le second modèle peut être vu comme une *mise en parallèle de deux modèles de Dahl* (l'un rapide et l'autre plus lent). Il modélise, en plus de ce que modélise Dahl (3.8), le frottement statique, mais ne prend pas en compte l'effet Stribeck. Ce modèle présente l'inconvénient d'être d'ordre deux, ce qui peut être gênant au niveau de l'initialisation des états [15].

Modèle LuGre

Le modèle LuGre, présenté dans [10], [11], [15] est le modèle qui reproduit le plus de phénomènes de frottements observés à ce jour. Il prend en compte, le frottement de Coulomb, Visqueux, statique, l'effet hystérésis et le pré-glisserment (tout comme Bliman - Sorine), mais il modélise aussi les variations de force de rupture ainsi que l'effet Stribeck. L'idée est de comparer deux surfaces en contact à deux corps rigides liés par des "brosses élastiques"⁵ (figure 3.4). Lorsqu'une force tangentielle est alors appliquée, les brosses vont se déformer comme des ressorts, ce qui va donner naissance au frottement.

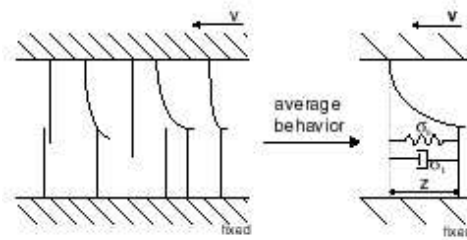


FIG. 3.4 – Interface entre deux surfaces en contact, au travers de l'aspect « brosse » et le modèle équivalent (similaire à un ressort + un coefficient d'amortissement)

Si la force appliquée est suffisamment importante, les brosses vont subir une déflexion⁶ telle, qu'elles vont se mettre à glisser. Ce phénomène est *hautement aléatoire*. Le modèle LuGre se base donc sur la moyenne de la déflexion des brosses, z . On obtient :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= v - \frac{|v|}{g(v)} z & (3.10) \\ F &= \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \\ g(v) &= F_C + (F_S - F_C) \exp(-|v/v_{stribek}|^2) \end{aligned}$$

Avec σ_0 , le coefficient de rigidité du ressort, σ_1 , le coefficient d'amortissement et σ_2 , le coefficient de frottement visqueux et $g(v)$, une fonction positive non nécessairement symétrique (dans laquelle on inclut les frottements de Coulomb et Stribeck).

⁵Elastic bristles

⁶Subir une déviation

3.4 Méthodes de compensation

Un problème évident introduit par les frottements est l'aspect non-linéaire et discontinu dû au changement de signe. En général, les faibles non-linéarités peuvent être approximées par une linéarisation, mais ceci n'est pas possible pour les frottements à cause de l'inversion de signe à vitesse nulle [14]. Une première façon de s'en affranchir est de tenter de les minimiser dès la conception du système, ou de lubrifier les parties en contacts. Une seconde, est de mettre au point une technique de compensation.

Dans la plupart des cas, l'imprécision due aux frottements ne peut être annulée par des gains élevés ou par l'ajout d'une action intégrale dans le correcteur. Dans cette section, présentons différentes méthodes de compensation.

Méthodes basées sur un modèle fixe

Cette famille de méthode de compensation basée sur le modèle⁷ consiste à utiliser un modèle de frottement, qui calcule la force de frottement escomptée, et à l'ajouter à la commande (de la même façon qu'avec la gravité).

$$U = U_{\text{Commande Classique}} + U_{\text{Compensation du Frottement}}$$

Avec $U_{\text{Compensation du Frottement}}$, la commande générée par le modèle choisi. Si le modèle de frottement choisi est un modèle statique, il suffit de connaître la vitesse et le couple de sortie. Si le modèle est dynamique, il est souvent adjoint un observateur d'état (observateur de z pour LuGre) (figure 3.5).

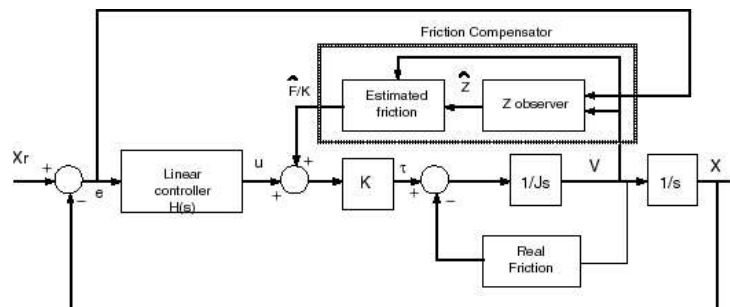


FIG. 3.5 – Schéma de compensation par feedback suivant le modèle de LuGre

Sur la figure 3.5, on remarque que le frottement est calculé en utilisant la vitesse mesurée. On peut également imaginer réaliser la même compensation mais en utilisant la vitesse désirée. Dans le premier cas on parle de compensation par *feedback*, et dans le second, par *feedforward*.

⁷Model-Based Compensation

La compensation par feedback est en théorie la plus performante car elle compense en fonction de la vitesse réelle (pas forcément la même que la vitesse désirée). La compensation par modèle est une technique souvent abordée dans la littérature ([10], [11], [19], [25], [31], [36]...).

Le fait que le frottement soit un phénomène complexe et aléatoire implique que les modèles ne sont pas encore parfaits et que l'identification des paramètres de ces derniers (notamment dynamiques) est complexe. C'est pourquoi une autre catégorie de technique consiste à ne pas utiliser de modèle, présentant l'avantage de s'affranchir de l'identification.

Le Dither

Le Dither est une méthode simple qui permet de *réduire les effets des frottements statiques*. On peut également le considérer comme une technique qui *adoucit l'effet discontinu* de frottement (figure 3.6).

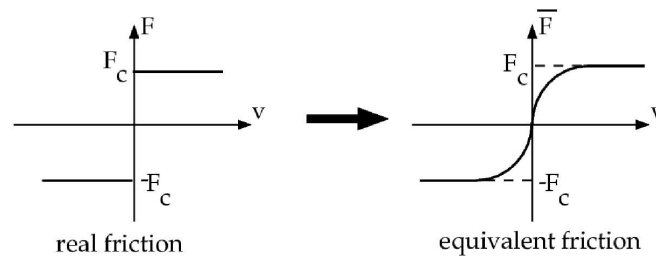


FIG. 3.6 – Effet linéarisant du Dither sur le frottement (ici de Coulomb)

Cette méthode consiste à introduire (ajout) mécaniquement ou électriquement une vibration haute fréquence afin de ne jamais se trouver en position de collage. Par exemple, la commande pourrait alors se présenter sous la forme : $U = U_{Commande\ Classique} + a \sin(\omega t)$.

Avec ω , une pulsation élevée. Derrière sa simplicité de mise en œuvre, cette méthode comporte plusieurs désavantages : elle requiert plus d'énergie, peut provoquer des vibrations non souhaitées et risque d'exciter des fréquences de résonance. On peut combiner un Dither avec un modèle de compensation.

Techniques adaptatives

Bien que certaines techniques adaptatives se basent sur un modèle [11], [21], on peut les assimiler à des techniques de compensation sans modèle dans la mesure où elles ne nécessitent pas d'identification de paramètres. Ces méthodes consistent généralement à adapter en ligne les coefficients du modèle du système piloté afin de tendre asymptotiquement vers une erreur

nulle. Les techniques adaptatives ne garantissent pas toujours une convergence des paramètres vers leur valeur réelle, mais une convergence vers zéro de l'erreur de suivi.

En Annexe D, nous présentons une fonction de tâche adaptative qui pourrait tout à fait être appliquée sur BIP pour faire de la compensation de frottement. En effet, si on note $\Phi(q, \dot{q}, \ddot{q})p = \text{Modèle Dynamique} + \text{Modèle de Frottement}$, avec p , un vecteur contenant les paramètres du modèle de frottement, on peut alors adapter en-ligne les forces de frottement de façon à converger vers une erreur nulle.

Technique basée sur les Séries de Fourier

Cette méthode, développée dans [1], consiste à approcher puis à compenser le frottement en tant que fonction du temps en le décomposant sous la forme d'une série de Fourier et en réalisant une adaptation des coefficients de cette série garantissant une convergence de l'erreur de suivi. Le frottement s'écrit alors :

$$F(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(w_i t) + b_i \sin(w_i t)) \quad (3.11)$$

PID modifié

D'autres méthodes modifient la structure PID afin de mettre en évidence des propriétés de compensation de frottement. C'est le cas de la méthode proposée dans [34] : celle-ci inverse le signe de sortie de l'intégrateur lorsque le signe de la vitesse change. Cela peut alors être vu comme un PID classique auquel on ajoute un terme de feedforward. La commande peut alors être écrite comme suit (figure 3.7) :

$$\begin{cases} u &= K_P e + K_D \dot{e} + K_I \int_0^t e d\tau + u_{FF} \\ u_{FF} &= K_I \operatorname{sgn}(v(t)) \int_0^t e \operatorname{sgn}(v(\tau)) d\tau - K_I \int_0^t e d\tau \end{cases} \quad (3.12)$$

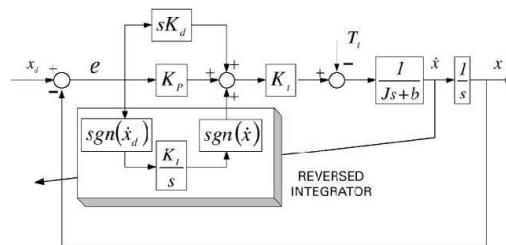


FIG. 3.7 – PD + Reversed position error integral control

Dans [34], les auteurs montrent que cette technique est simple à mettre en œuvre et à implanter numériquement (simple modification du PID classique).

3.5 Bilan et perspectives

3.5.1 Tour d’horizon bibliographique

Dans [25], [31] et [36], les auteurs réalisent une compensation basée sur un modèle de frottement statique combiné à un observateur de vitesse. Ils mettent en avant le fait que le calcul de la vitesse par résolution numérique d’équations différentielles est très sensible aux bruits de mesure, ce qui motive l’utilisation d’un observateur de vitesse (l’estimé converge asymptotiquement vers la vitesse réelle). Les auteurs de [21] réalisent aussi un observateur de vitesse muni d’un modèle de frottement statique adaptatif. Une des originalités apportée réside dans l’application, proche de la notre : robot fonctionnant dans l’espace de la tâche.

Les auteurs de [10], [11] et [12], réalisent une compensation basée sur le modèle dynamique le plus complet, LuGre. L’estimation des paramètres du modèle dynamique est faite hors-ligne dans [10] et [12], ou est mise à jour par une loi d’adaptation dans [11]. L’originalité de [12] est qu’il adjoint au modèle de frottement un observateur de perturbation pour corriger les erreurs de modélisation. De plus il applique son étude à un robot (et pas seulement à un moteur), ce qui est d’autant plus intéressant pour notre application. Dans [24], les auteurs réalisent une compensation basée sur le modèle et proposent une méthode pour mesurer les frottements pour les robots manipulateurs et montrent que la compensation (qui fournit un gain en précision) ne nuit pas à la rapidité du système.

Dans [30], les auteurs se focalisent sur le problème de *stick-slip*, qui ressort comme le phénomène le plus contraignant dans tous les systèmes mécaniques. Ils proposent une compensation (basée sur un modèle) non-linéaire ne nécessitant que la connaissance d’une borne supérieure du frottement.

M. Alamir, dans [1], s’affranchit de l’identification des paramètres (fonction de la température, lubrification...) et propose de compenser le frottement sans utiliser de modèle⁸. Il montre que la décomposition en séries de Fourier d’une force de frottement $F(t)$, adjointe à une loi d’adaptation mettant à jour les coefficients de Fourier, permet d’obtenir des résultats très encourageants comparés aux méthodes traditionnelles basées sur le modèle.

Une méthode sans modèle est proposée dans [34]. Elle montre que la compensation de frottement peut être atteinte en modifiant le terme integral d’un PID (inverser le signe de l’integral dès que le signe de la vitesse change). Un point intéressant de cet article est qu’il explique comment réaliser l’implantation pratique (notamment sur un PID industriel).

Le frottement étant une force si complexe à modéliser que certains auteurs [9], [26], [33]

⁸Direct Adaptation Scheme

orientent leurs recherches vers des observateurs de perturbations qui fournissent une image de la force à compenser.

3.5.2 Conclusion

Le frottement, de par sa non-linéarité et son changement de signe, pose problème notamment dans l'asservissement en position des systèmes mécaniques. La modélisation de ce phénomène est complexe et les modèles comptent presque tous plus de quatre paramètres (lourd pour l'estimation). De manière générale on constate que le point le plus gênant est celui du *stick-slip* qui est le premier phénomène que l'on cherchera à faire disparaître. En ce qui concerne la méthode de compensation, on retrouve deux grandes catégories : les *méthodes basées sur le modèle* (statique ou dynamique) et les *méthodes sans modèle*.

Le problème majeur des méthodes sans modèle (ou adaptatives), est qu'elles compensent, en réalité, toutes les forces, non ou mal modélisées. Dans le cas de BIP cela peut être dangereux car une personne qui se trouve dans le champ du mouvement pourrait être blessée (celle-ci constituant une force d'opposition que la compensation tendrait à compenser). Une solution peut être de borner la compensation de façon à limiter les mouvements et forces déployées ; ce qui reviendrait alors à faire une compensation maîtrisée, basée sur un modèle (implique une identification préalable des paramètres).

Les méthodes basées sur le modèle sont très bonnes si l'on connaît bien les paramètres qui le constituent. Ainsi, il est compliqué de mettre en œuvre sur un système complexe (comme un robot bipède) une compensation basée sur un des modèles dynamiques (multitude de paramètres). C'est pourquoi une modélisation statique est plus souvent employée ; celle-ci posant déjà le problème du calcul de la vitesse (principalement les faibles vitesses).

Ce calcul est d'ailleurs un point central souvent abordé dans la littérature. Un calcul par résolution numérique (Euler explicite, implicite. . .) pose problème car très sensible aux bruits de mesure. Une approche récurrente à ce sujet est de concevoir un observateur de vitesse. Une autre possibilité est de se baser non pas sur la vitesse mesurée (ou calculée) mais sur la vitesse désirée (pré-calculée), en espérant qu'elle soit proche et surtout de même signe.

On peut regretter le fait que les auteurs ne s'attardent que très rarement sur les problèmes liés à l'implantation du contrôleur (période d'échantillonnage, quantification. . .). C'est pourtant un point qui nous paraît essentiel, surtout lorsque l'on fait de la compensation basée sur le modèle, et encore plus lorsque ce modèle est dynamique. Ces derniers induisent une dynamique forte, qui lors de l'implantation numérique peut être difficile à reproduire sur un calculateur embarqué.

Un dernier point, peu abordé dans la littérature concerne le fonctionnement sous charge variable. Pour notre application cela sera certainement un élément prioritaire que nous devons

prendre en compte. De plus il est important de noter que BIP possède une mécanique complexe avec par exemple, des articulations munies de vis à rouleau satellite + biellette sans doute endomagées qui ne collent pas avec les modèles traditionnels. Dans notre cas le frottement sera fonction de la position articulaire.

3.5.3 Perspectives

Globalement il ressort de cette étude que le frottement est un phénomène très complexe et gênant dans les systèmes mécaniques et qu'il convient de le compenser par une technique spécifique.

Rappelons que les effets indésirables du frottement sont, l'apparition d'erreurs statiques et de cycles limites. Dans [28] les auteurs démontrent, pour un problème de simple régulation et avec un modèle statique, que la sous-compensation conduit à une erreur statique et que la sur-compensation mène à un cycle limite. Si on étend cette constatation à un suivi de trajectoire (comme c'est le cas sur BIP), on conçoit bien que la sous-compensation risque de provoquer un retard de suivi ainsi que des décrochages périodiques, et que la sur-compensation provoquera des oscillations autour de la trajectoire de référence.

Ce qui apparaît alors, c'est qu'il n'est pas possible de compenser correctement le frottement avec un modèle dont les paramètres n'ont pas été identifiés avec précision. Ce type de technique semble alors compliqué à mettre en œuvre sur un système complexe comme le bipède ; en effet une mauvaise estimation des paramètres conduirait à un des effets indésirables cités précédemment et une identification précise sur ce système représente un travail important sans pour autant garantir un résultat. Cependant, ce type de technique a fait ces preuves sur certains systèmes (moteurs électriques par exemple).

On peut alors s'interroger sur la validité des méthodes présentées en fonction du système piloté et ainsi s'interroger sur le degré de précision qu'un modèle de frottement peut atteindre (quels phénomènes souhaitons-nous réellement compenser et quel doit être notre précision). A partir de quel point faut-il opter pour une compensation adaptative (ou sans modèle) plutôt qu'une compensation fixe ? Une étude sur la façon de définir la fonction signe peut être menée (en tenant compte de l'incertitude du calcul numérique de la vitesse). Dans la même optique, définir un estimateur de vitesse qui prendrait en compte la précision de la position et sa quantification (dans notre cas, fournies par le pas de codeur).

Deuxième partie

**Réalisations pratiques et Résultats
obtenus**

Chapitre 4

Estimateur de vitesse

L'étude bibliographique nous a montré que le calcul de la vitesse était un point prépondérant et sensible lorsque l'on aborde les problèmes de frottements. Nous avons également vu que ce calcul était souvent réalisé par un observateur plutôt que par un calcul différentiel (trop bruité). Dans ce chapitre nous présentons la problématique, les orientations scientifiques choisies, la démarche employée pour les mettre en œuvre et les résultats obtenus.

4.1 Problématique globale et cadre de l'étude

Sur BIP les frottements sont un problème relativement nouveau. Actuellement, la compensation de ces derniers est réalisée à partir d'un simple *modèle statique* en ne prenant en compte que le frottement cinétique et visqueux (avec des coefficients constants pour chaque moteurs, estimés expérimentalement). Ce type de compensation ne donne pas entière satisfaction et, du fait de la forte discontinuité en vitesse du frottement, la façon dont celle-ci est calculée nous paraît être un point important à étudier.

L'idée est qu'il faut être à même d'estimer correctement la vitesse pour pouvoir réaliser une compensation classique correcte (à partir d'un modèle statique, fonction de la vitesse). De plus, une amélioration de l'estimation de la vitesse nous laisse espérer en une amélioration du suivi de trajectoire global.

L'estimateur actuellement implanté sur la plateforme BIP et le simulateur HuMAnS (Sci-lab) fournit une estimation correcte mais doit pouvoir être amélioré. Il s'exprime d'une façon très simple :

$$\dot{q}_k = K_{\text{filtre}} \frac{q_k - q_{k-1}}{dt} + (1 - K_{\text{filtre}}) \dot{q}_{k-1} \quad (4.1)$$

Le terme $\frac{q_k - q_{k-1}}{dt}$ n'est autre que le calcul par équations aux différences de la vitesse articulaire qui, étant bruité, est pondéré par le coefficient K_{filtre} choisi expérimentalement.

Dans la littérature on remarque que la plupart des scientifiques s'orientent dans la direction *d'observateurs de vitesse* plutôt que dans celle des équations aux différences. Ainsi, nous avons choisi d'explorer cette voie en particulier.

4.2 Mise en forme du problème

La première chose à réaliser est de modéliser le système que l'on étudie. La chaîne de calcul de la vitesse est la suivante :

- Acquisition de la position θ des 15 moteurs via un codeur 4096 points (dimension 15x1)
- Reconstruction du vecteur des positions articulaires q (dimension 21x1)
- Calcul de la vitesse articulaire \dot{q} (dimension 21x1)

Nous voulons estimer la vitesse articulaire. On décrit alors le système sous la forme suivante (double intégrateur d'entrée \ddot{q} et de sortie q) :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.2)$$

A partir de ce système, on écrit un observateur d'état asymptotique suivant (qui assure une convergence de l'estimé vers la valeur réelle) :

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{q}} \\ \dot{\hat{\dot{q}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \hat{\dot{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} (q - \hat{q}) \quad (4.3)$$

La vitesse de convergence est fixée par le choix des gains de la matrice $L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$. Ici nous avons choisi de réaliser un placement de pôles. Si on appelle ce pôle $a (> 0)$, les gains l_1 et l_2 sont définis par : $l_1 = 2a$ et $l_2 = a^2$. En Annexe E, une description des calculs réalisés pour aboutir à ces coefficients est fournie.

4.3 Réalisation pratique et implantation

Une fois le problème mis en forme (théoriquement), nous simulons son comportement dans le logiciel HuMAnS en tenant compte ainsi des autres contraintes du système comme la période d'échantillonnage, la quantification, le retard... Pour cela, il nous faut donc tout d'abord discrétiser l'observateur, et l'intégrer au simulateur (en Annexe E, on trouve le détail cette discrétisation).

Dans la plupart des documents scientifiques, les aspects de discrétisation (choix de la méthode) ainsi que ceux des choix des gains ne sont pas abordés. Ce sont pourtant des problèmes bien plus conséquents qu'il n'y paraît. Sur BIP et HuMAnS, la fréquence d'échantillonnage est de 100 Hz (ce qui est assez lent), donc les seuls degrés de liberté que nous avons résident dans le placement des pôles et dans le choix de la méthode de discrétisation.

4.4 Résultats et problèmes rencontrés

Dans cette section nous présentons les résultats obtenus, puis en les analysants, nous proposerons quelques modifications à apporter à notre estimateur. Le logiciel HuMAnS est doté de plusieurs outils d'analyses. Il nous permet de connaître avec exactitude la position et la vitesse articulaire du robot. Ainsi dans tous nos tests il est possible de comparer l'estimée avec la vitesse réelle. De cette manière, on peut de façon très simple apprécier la précision des méthodes développées en comparant les erreurs.

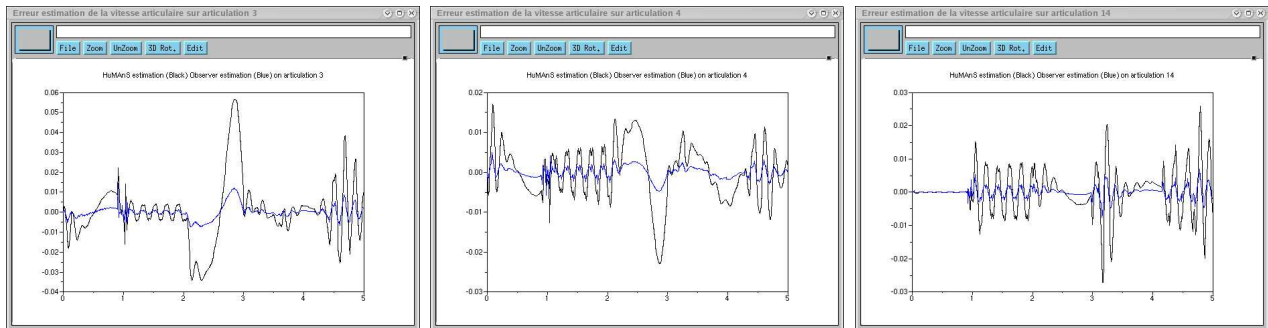


FIG. 4.1 – Comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse articulaire selon HuMAnS (noir) et selon notre observateur (bleu) sur l'articulation 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et 14 (lombaires)

On constate sur la figure 4.1 que l'observateur asymptotique fournit de bien meilleurs résultats que les équations aux différences. Cependant, dans cette expérience, nous avons utilisé un signal de position continu et parfaitement connu, c'est à dire sans simuler l'échantillonnage et la quantification introduite par les codeurs des moteurs (comme c'est le cas sur BIP). Sur la figure 4.2, on compare les erreurs des signaux de position quantifiés et non quantifiés.

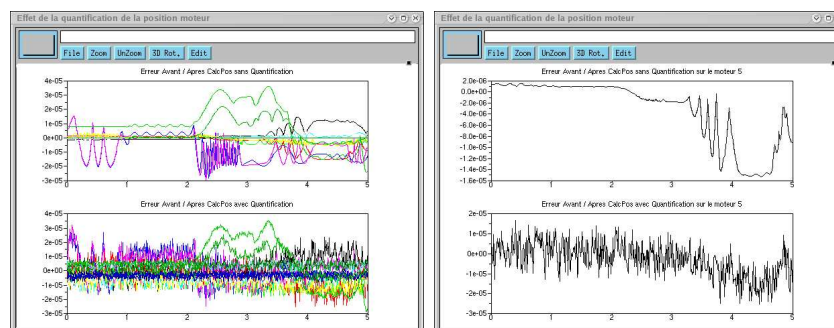


FIG. 4.2 – Erreur introduite par la quantification des codeurs moteurs sur la position moteur, à gauche sur tous les moteurs, à droite sur le moteur 5 (cheville gauche interne)

Bien que l'amplitude du bruit soit très faible, celui-ci change complètement l'estimation de vitesse, comme le prouve la figure 4.3.

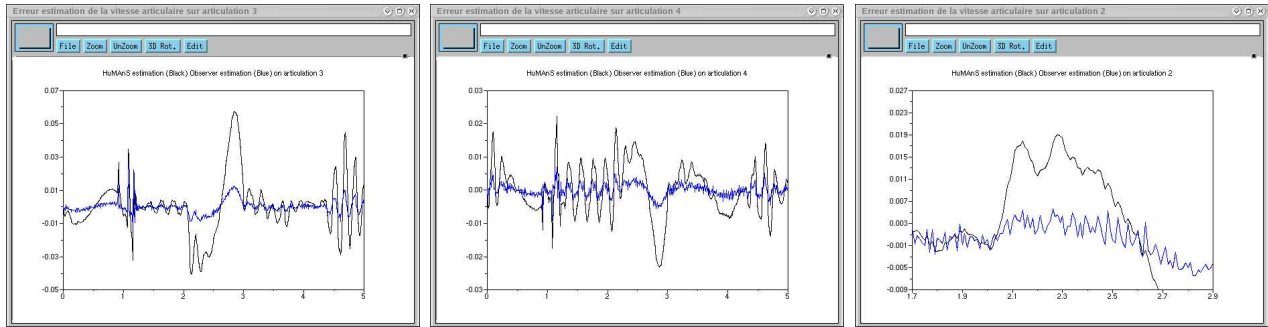


FIG. 4.3 – Comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse articulaire selon HuMANs (noir) et selon notre observateur (bleu) sur l'articulation 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et zoom sur l'axe 2 (cheville droite interne) en utilisant les signaux quantifiés des codeurs moteurs

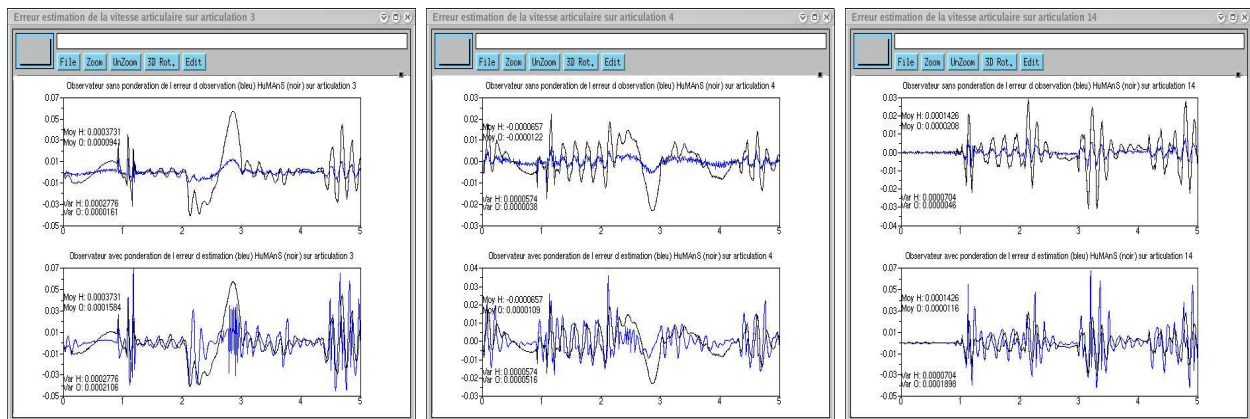


FIG. 4.4 – En haut : comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse de l'observateur classique (bleu) à celle de HuMANs (noir). En bas : comparaison de l'erreur d'estimation de vitesse de l'observateur non linéaire (bleu) à celle de HuMANs (noir), sur les articulations 3 (genou droit), 4 (cuisse droite) et 14 (lombaires)

Cette quantification détériore l'observateur asymptotique (introduit un bruit numérique haute fréquence), c'est pourquoi nous avons tenté par plusieurs mécanismes de s'en affranchir. Un pré ou post-filtrage n'améliorant rien, nous avons testé une méthode singulière. Celle-ci consiste à pondérer l'erreur d'estimation en fonction du pas du codeur. On considère que si l'erreur d'observation (entre la position mesurée et celle observée) est plus petite que la précision que peut fournir le codeur sur la position de l'arbre moteur, alors on peut pressentir que celle-ci est incorrecte. On choisit donc de pondérer cette erreur par un coefficient entre

0 et 1 (ce qui équivaut en réalité à réduire les gains l_1 et l_2 de l'observateur, et à baisser la dynamique d'observation). Ce procédé fait que l'observateur devient non-linéaire (figure 4.4).

En étudiant la moyenne et la variance des erreurs pour chacune des méthodes, on observe que l'observateur asymptotique fournit de meilleurs résultats (figure 4.5).

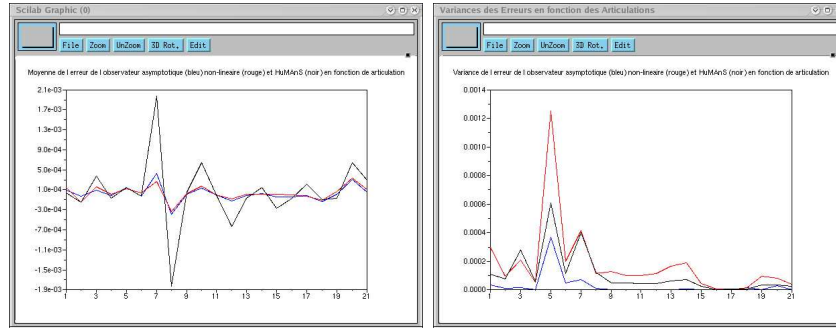


FIG. 4.5 – À gauche la moyenne, à droite la variance de l'erreur de HuMANs (noir), observateur asymptotique (bleu) et observateur non linéaire (rouge) en fonction des articulations

Grâce à cet observateur non linéaire on réduit le bruit mais c'est au prix d'une moins bonne estimation...

4.5 Conclusion

Nous avons mis en avant dans cette partie le fait qu'un observateur pouvait améliorer l'estimation de la vitesse. Grâce à ce type d'observateur on peut espérer améliorer le suivi de trajectoire et la compensation de frottement basée sur un modèle statique. Nous n'avons pas encore implanté cet observateur sur BIP pour confirmer ces hypothèses (seul des tests sur HuMANs ont été réalisés). Peu de tests sur le robot ont été effectués car nous nous intéressons à une autre catégorie de méthode de compensation : les méthodes sans modèle. L'une d'elles est développée dans le chapitre qui suit.

4.6 Perspectives

A court terme, l'objectif est d'implanter sur le robot cet observateur. Durant la réalisation de ce procédé de calcul de la vitesse, nous avons mis en avant plusieurs problèmes qui peuvent être intéressants à traiter. Notamment étudier les effets de la quantification et trouver des moyens pour avoir un signal de vitesse juste et peu bruité. Il peut être également intéressant d'étudier le comportement de ces observateurs en fonction des différentes méthodes de discrétisation.

Annexe E

Observateur de vitesse

E.1 Calcul des gains de l'observateur

Pour assurer une estimation qui converge vers la valeur réelle, nous fixons (via les pôles) la dynamique de l'erreur d'estimation de la façon suivante :

$$(A - LC - pI) = (p + a)^2 \quad (\text{E.4})$$

$$\Leftrightarrow p^2 + l_1 p + l_2 = p^2 + 2ap + a^2 \quad (\text{E.5})$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} l_1 = 2a \\ l_2 = a^2 \end{cases} \quad (\text{E.6})$$

Avec p , l'opérateur de Laplace et I , la matrice identité.

E.2 Discrétisation de l'observateur

Une fois l'observateur réalisé et validé sous la forme continue, pour l'implanter sur un calculateur, nous devons le discrétiser. Il existe plusieurs techniques de discrétisation qui ont chacune leur propriétés [2].

Ici, nous avons choisi la méthode des *forward differences* qui consiste à transformer l'opérateur de Laplace p par $\frac{z-1}{Te}$, avec Te la période d'échantillonnage. On a alors :

$$\begin{cases} \dot{\hat{q}} = \hat{q} + l_1 (q - \hat{q}) \\ \hat{q} = u + l_2 (q - \hat{q}) \end{cases} \quad (\text{E.7})$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (z - 1) \hat{q} = Te (\hat{q} + l_1 (q - \hat{q})) \\ (z - 1) \hat{q} = Te (u + l_2 (q - \hat{q})) \end{cases} \quad (\text{E.8})$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \hat{q}_{k+1} = \hat{q}_k + Te (\hat{q}_k + l_1 (q_k - \hat{q}_k)) \\ \hat{q}_{k+1} = \hat{q}_k + Te (u_k + l_2 (q_k - \hat{q}_k)) \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

Chapitre 5

Estimateur de perturbations

Les frottements qui agissent sur le robot BIP sont très complexes à modéliser pour plusieurs raisons : le fonctionnement sous charge variable, la complexité des actionneurs qui le composent (vis à rouleaux, biellettes), l'usure des systèmes de transmission. . . L'observation expérimentale du robot BIP nous a permis de mettre en avant un point essentiel qui est que le frottement est avant tout *fonction de la position articulaire du système*.

Dans ce chapitre nous introduisons le cadre de l'étude et sa problématique particulière. La démarche, l'approche et les choix scientifiques sont présentés ainsi que les résultats théoriques et expérimentaux. Enfin, des perspectives d'études futures sont suggérées.

5.1 Problématique globale et cadre de l'étude

La loi de commande actuellement implantée sur le robot BIP (Proportionnel-Dérivée avec compensation de gravité) ne permet pas de réaliser une marche tridimensionnelle statiquement stable. Le problème majeur qui biaise le suivi de trajectoire, est dû à la présence des phénomènes de frottements. Bien qu'une compensation basée sur un modèle statique de Coulomb + visqueux (avec des paramètres invariants estimés expérimentalement) a d'ores et déjà été mise en place, les résultats obtenus ne sont pas encore assez satisfaisants et le problème de frottement reste entier.

L'étude bibliographique nous a permis d'identifier plusieurs techniques permettant de compenser efficacement le frottement (modèle dynamique, commandes adaptatives, observateur de forces-perturbations). Dans notre cas, le choix de compensation basée sur un modèle dynamique est complexe à mettre en œuvre car l'identification des paramètres est lourde et ne garantit pas un résultat. La solution de la commande adaptative (appliquée à la fonction de tâche, exposée en Annexe D) est audacieuse dans le cadre de ce stage (car cette commande fonctionne sur le simulateur HuMAnS, mais nécessite encore des réglages sur BIP). C'est pourquoi nous penchons vers la solution d'une compensation basée sur un observateur de *forces-perturbations*, plus simple à intégrer à la commande déjà existante.

5.2 Mise en forme du problème

L'idée générale est d'estimer les forces non ou mal modélisées qui agissent sur le système, et de les compenser par feedforward. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux articles scientifiques qui ont mis en évidence le frottement via cette stratégie [33]. On décrit le système réel et perturbé en entrée de la façon suivante (double intégrateur perturbé en entrée) :

$$\begin{cases} \dot{x} &= (A_0 + \Delta A) x + (B_0 + \Delta B) u + E d \\ &= A_0 x + B_0 u + (\Delta A x + \Delta B u + E d) \\ &= A_0 x + B_0 u + E \tilde{d} \\ y &= C x \\ \tilde{d} &= d + E^T (\Delta A x + \Delta B u) \end{cases} \quad (5.1)$$

Avec A_0 et B_0 , identifiant le système réel, ΔA et ΔB les variations respectives de A et B (erreurs de modélisation), E le vecteur de perturbations et \tilde{d} la perturbation étendue. Ici, c'est $E \tilde{d}$ que nous allons chercher à estimer puis à compenser.

Dans [33], les auteurs proposent d'intégrer cette perturbation au système, pour ainsi aboutir à une définition du système augmenté (5.3). Pour cela, une hypothèse sur la dérivée $p^{\text{ième}}$ doit être faite (5.2). Les matrices et vecteurs ont donc une dimension augmentée de p éléments.

$$\frac{d^{(p)} \tilde{d}}{dt^p} = 0 \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} &= \tilde{A}_0 \tilde{x} + \tilde{B}_0 u \\ y &= \tilde{C} \tilde{x} \end{cases} \quad (5.3)$$

Le système n'est pas complètement commandable, mais il est complètement observable, ce qui nous permet de concevoir un observateur d'état (voir Annexe F), qui va nous permettre d'estimer la perturbation \tilde{d} par $\hat{\tilde{d}}$. Ainsi, la commande à envoyer devient : $u = u_{\text{ref}} + u_{\text{dis}}$, avec u_{dis} la commande fonction de la perturbation observée (figure 5.1).

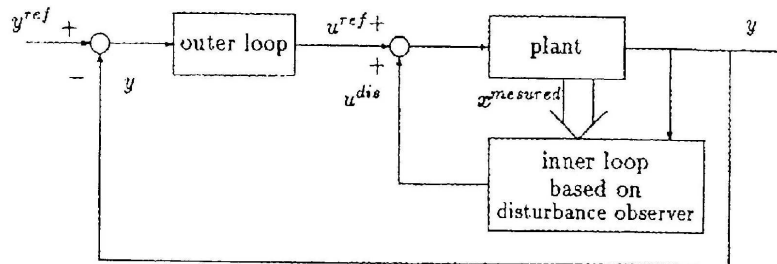


FIG. 5.1 – Schéma de compensation et de régulation (contrôleur-estimateur en cascade) [33]

5.3 Réalisation et implantation de l'observateur

5.3.1 Principe d'observation et de compensation

D'après le principe énoncé précédemment, et à partir des résultats obtenus dans l'article [33], qui utilisent le processus d'estimation de Gopinath (5.5), nous faisons l'hypothèse la plus simple que $\dot{\tilde{d}} = 0$. Ainsi, nous écrivons le système augmenté de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \\ \dot{\tilde{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \tilde{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \tilde{d} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\tilde{d}} = k_1 q + z_1 \\ \dot{z}_1 = -k_1 z_2 - k_1 k_2 q \\ \dot{z}_2 = z_1 - k_2 z_2 + (k_1 - k_2^2) q + u \end{array} \right. \quad (5.5)$$

Ceci nous mène alors à estimer la perturbation de la manière suivante :

$$\hat{\tilde{d}} = \frac{k_1}{s^2 + k_2 s + k_1} (s^2 q - u) = \frac{k_1}{s^2 + k_2 s + k_1} \tilde{d} = G(s) \tilde{d} \quad (5.6)$$

Avec k_1 et k_2 , les gains de l'observateur tels que $\alpha + \beta = -k_2$ et $\alpha\beta = k_1$ (α et β les pôles équivalents de cet estimateur).

Ici, nous avons donc réalisé un observateur de perturbation de \ddot{q} . Or il nous faut tenir compte de la dynamique globale du robot (inertie, contacts...) afin de calculer u_{dis} (figure 5.2). Pour cela nous reprenons le modèle défini dans le chapitre 1 sur la modélisation.

$$u_{dis} = M(q) \hat{\ddot{q}} + N(\dot{q}, q) \dot{q} + G(q) - C^T \lambda - G(s) u_{ref} \quad (5.7)$$

De cette façon nous n'identifions que les effets non modélisés. Si l'observation est faite sans aucun retard, alors la compensation sera parfaite, ce qui confère une certaine robustesse au robot. Cependant, l'équation (5.6) montre que la perturbation est estimée au travers d'un filtre passe-bas, qui va introduire un retard à l'estimation donc à la compensation. Ce retard sera fonction des pôles du filtre.

5.3.2 Réalisation

D'après l'équation (5.6), nous notons que pour réaliser cette observation il ne nous faut guère plus que créer deux filtres, l'un sur la position articulaire q , l'autre sur la commande en couple u et adjoindre la dynamique du robot (figure 5.2).

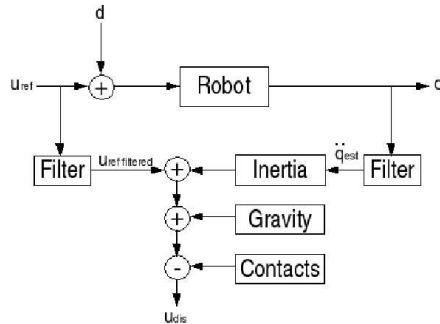


FIG. 5.2 – Schéma d’observation de perturbation (observateur en turquoise)

Malgré l’apparente simplicité, il est ambitieux de réaliser une modification dans la loi de commande d’un système comme le bipède sans réaliser de simulations au préalable. Etant donné que le concept d’observation-compensation de forces est un domaine nouveau pour la plateforme BIP, nous avons tout d’abord réalisé une simulation du système sous la forme en continu avec Matlab/Simulink pour valider le concept.

Une fois le fonctionnement théorique dans le domaine continu validé, nous discrétisons les filtres dans le but de se rapprocher de la réalisation pratique. Pour cela, il existe plusieurs techniques de discrétisations [2], parmi elles :

$$s = \frac{z - 1}{Te} \text{ Forward difference}$$

$$s = \frac{z - 1}{zTe} \text{ Backward difference}$$

$$s = \frac{2}{Te} \frac{z - 1}{z + 1} \text{ Tustin approximation}$$

Les différences de chacune de ces méthodes concernent notamment le domaine de stabilité [2]. La méthode de Tustin nous fournit une parfaite équivalence des domaines de stabilité entre le continu et le discret. C’est celle-ci que nous avons choisie d’utiliser.

Nous avons ensuite écrit cet observateur en Scilab puis intégré au simulateur HuMANs, qui simule de façon très précise la dynamique du robot BIP. Enfin, nous avons écrit la fonction C, que nous avons d’abord débogué sous Scilab, puis testé sur la plateforme réelle.

5.4 Résultats et problèmes rencontrés

Dans cette section, nous présentons les différents résultats obtenus, de la simulation à l’expérimentation. Nous mettons en évidence les avancées, les problèmes rencontrés et les points qui nous semblent intéressants à explorer à l’avenir.

5.4.1 Simulations

Cette étape de simulations (sous Simulink) doit permettre dans un premier temps de valider les concepts d'observation et de compensation. Pour cela nous avons modélisé le système double intégrateur, ajouté un régulateur, puis l'observateur de perturbations. Ensuite nous générons une perturbation sur l'entrée que nous observons puis compensons. Le schéma Simulink est décrit figure 5.3.

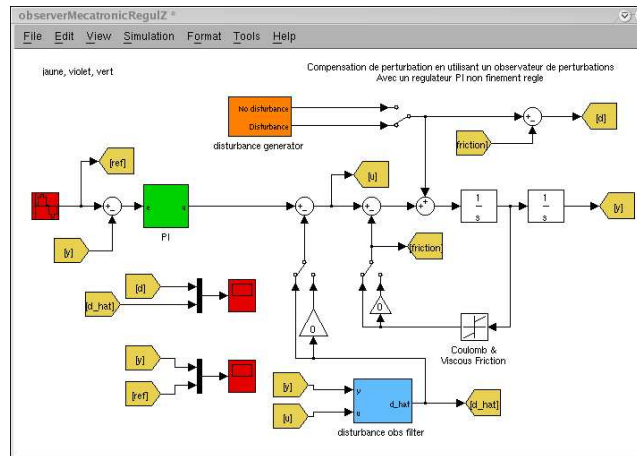


FIG. 5.3 – Système double intégrateur avec sa compensation de perturbation basée sur un estimateur discrétisé (sous Simulink)

Les courbes obtenues (Annexe F) nous ont permis de valider la structure de notre estimateur compensateur. Nous sommes alors très vite passés à l'expérimentation sur BIP et aux tests sur HuMANs, jugés plus pertinents.

5.4.2 Réalisations expérimentales

Le concept étant validé, nous passons à l'expérimentation sur la plateforme réelle. Pour cela, nous envoyons des couples en entrée des actionneurs du robot (pour que ces derniers fassent plusieurs allés retours articulaires) et nous récupérons les positions des moteurs, des articulations et les tensions envoyées.

Expérimentations hors ligne

Dans un premier temps, nous enregistrons sur le robot les données nécessaires à notre estimateur (la position articulaire q et la tension $USent$ envoyée aux moteurs pour obtenir cette position) et les traitons hors ligne. Ainsi, on obtient les courbes de forces non modélisées en fonction de la vitesse de rotation des moteurs pour chaque axe (figure 5.4).

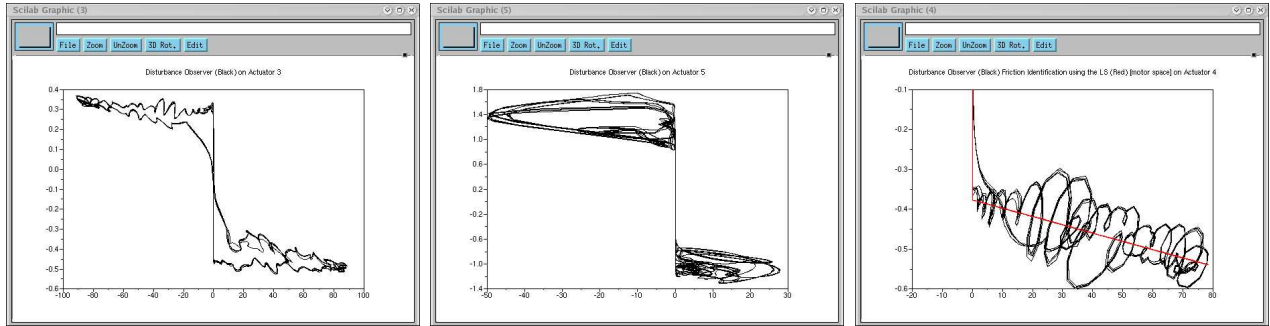


FIG. 5.4 – De gauche à droite : force non modélisée estimée en fonction de la vitesse des moteurs pour les axes 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et zoom sur les boucles de l’axe 4 (cuisse droite)

L’allure de ces courbes et la discontinuité qu’elles présentent rappellent les forces de frottement de type de Coulomb + visqueux mais des effets non linéaires inconnus sont également présents : ondulations, boucles, hystérésis. Bien que l’on sache que le frottement soit un phénomène complexe, non linéaire et qu’il comporte des effets de type hystérésis, ceux que l’on observe sont extrêmement plus marqués. De plus, ces non linéarités et boucles se répètent tout au long de l’expérimentation (voir zoom à droite de la figure 5.4). Ces tracés nous confortent dans l’idée que c’est principalement le frottement qui gêne le suivi de trajectoire du robot, mais nous indiquent également autre chose...

Le fait de réaliser ces expérimentations hors-ligne nous permet également de comparer notre estimateur (*estimateur dynamique*) au modèle inverse du robot (*estimateur statique*) que Pierre-Brice Wieber avait réalisé avant mon arrivée. Cet estimateur statique recalcule à partir des positions articulaires les couples (donc les tensions) qui auraient dûes être envoyés pour atteindre cette position et les soustrait aux tensions réellement envoyées. Le calcul de cet estimateur statique est (on néglige les effets non-linéaires) :

$$\begin{aligned}
 U_{dis} &= U_{effective} - U_{sent} \\
 U_{effective} &= M(q)\ddot{q} + G(q) \\
 \ddot{q} &= \frac{q_{k-1} - 2q_k + q_{k+1}}{dt^2}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

A ce calcul, Pierre-Brice Wieber applique une estimation par les moindres carrés développée sur un modèle de Coulomb + visqueux que nous réutilisons sur notre signal (estimateur dynamique). On peut alors comparer les résultats des deux approches, et le résultat des moindres carrés (figure 5.5).

Ce second résultat nous conforte dans la justesse de l’estimateur réalisé car on retrouve les mêmes types de boucles que dans le premier cas, mais en moins prononcées. En regardant de manière plus précise la structure de notre estimateur dynamique on constate qu’il est identique à celui statique à un filtrage près, $G(s)$, qui s’applique à nos deux signaux \ddot{q} et u .

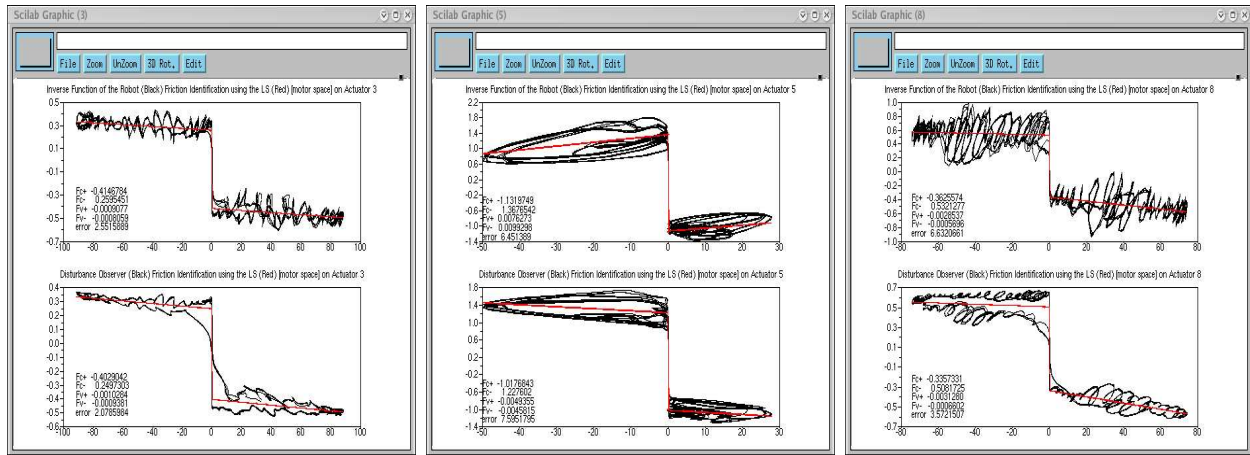


FIG. 5.5 – De gauche à droite : en noir, comparaison de l’estimation statique (haut) et dynamique (bas) en fonction de la vitesse des moteurs sur les articulations 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et 8 (cuisse gauche) + Moindres carrés (rouge)

Ce filtre à lui seul (basé sur l’hypothèse que $\dot{d} = 0$) peut expliquer le fait que l’estimation est moins bruitée. Sur la figure 5.6, où l’on trace la force estimée en fonction du temps, on voit plus clairement les effets du filtre (qui atténue les hautes fréquences).

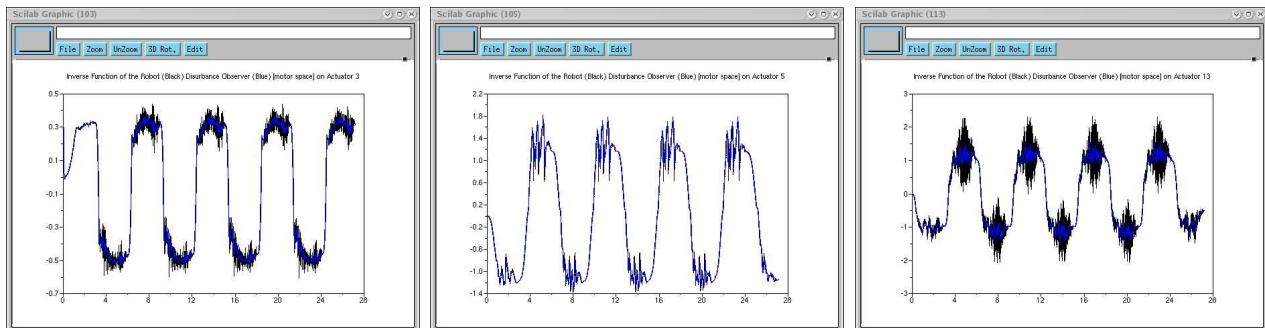


FIG. 5.6 – De gauche à droite : comparaison de l’estimation des perturbations statique (noir) et dynamique (bleu) en fonction du temps sur les articulations 3 (genou droit), 5 (cheville gauche interne) et 13 (bassin)

Remarque : dans l’estimation statique on utilise des données de l’instant $t + 1$ pour retrouver le couple envoyé de façon exacte. Cet estimateur n’est donc pas implémentable en temps-réel avec une telle précision.

Nous avons vu précédemment que dans notre cas les frottements pouvaient être fonction non pas de la vitesse mais de la position articulaire. Une observation marquante apparaît

alors : les boucles que nous observions précédemment (sur les figures 5.4 et 5.5 en fonction de la vitesse) semblent correspondre aux ondulations périodiques de la figure 5.7, fonction de la position.

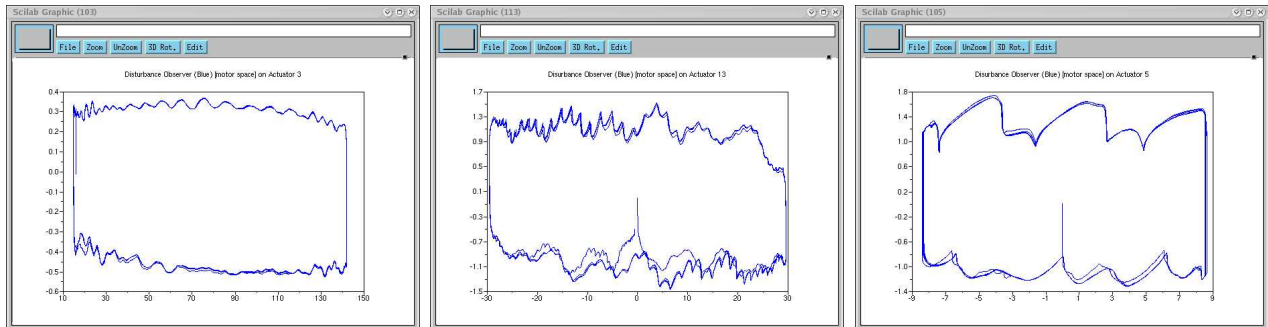


FIG. 5.7 – De gauche à droite : estimation dynamique des perturbations en fonction de la position moteur sur les articulations 3 (genou droit), 13 (bassin) et 5 (cheville gauche interne)

Ces courbes qui présentent des ondulations périodiques laissent à penser que les frottements (et les forces mals modélisées) sont bien fonction de la position.

Expérimentations en ligne

Une fois l'algorithme d'estimation validé, nous le réalisons en C de façon à l'implanter et à le faire tourner en temps réel sur BIP, puis nous le comparons avec les résultats obtenus hors ligne. Sous Scilab il est possible de tester des fonctions directement en C, ainsi nous n'avons pas eu besoin de modifier la structure du code au moment de passer sur le robot BIP. Les mouvements réalisés par le robot, pour ces expériences, sont simplement un aller retour articulaire. Les estimations obtenues en ligne et hors ligne sont présentées en figure 5.8.

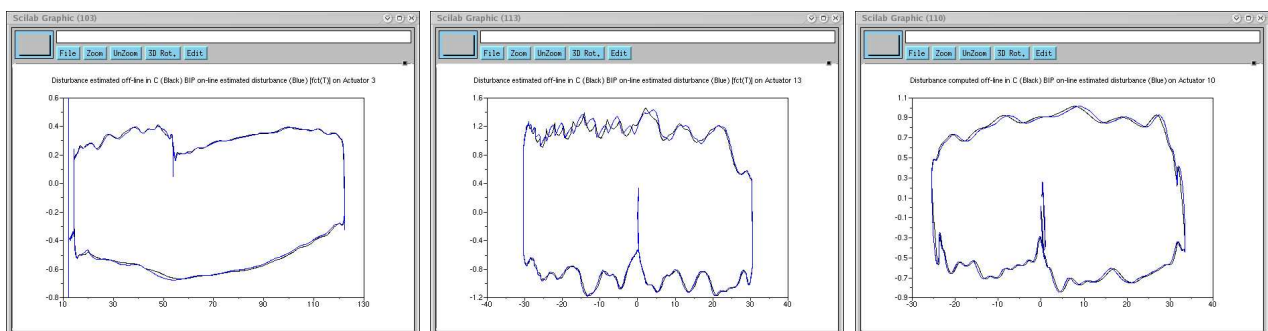


FIG. 5.8 – De gauche à droite : estimation dynamique des perturbations en ligne (bleu) et hors ligne (noir) en fonction de la position moteur sur les articulations 3 (genou droit), 13 (bassin) et 10 (hanche)

La fonction d'estimation implantée sur le robot nous fournit des résultats sensiblement identiques à ceux obtenus en simulation. L'objectif est donc de reboucler l'estimé pour le compenser. Les expérimentations à ce sujet sont encore en cours, mais on peut déjà, en terme de premier résultat montrer (figure 5.9) l'amélioration sur le suivi de trajectoire pour un axe uniquement (genou droit).

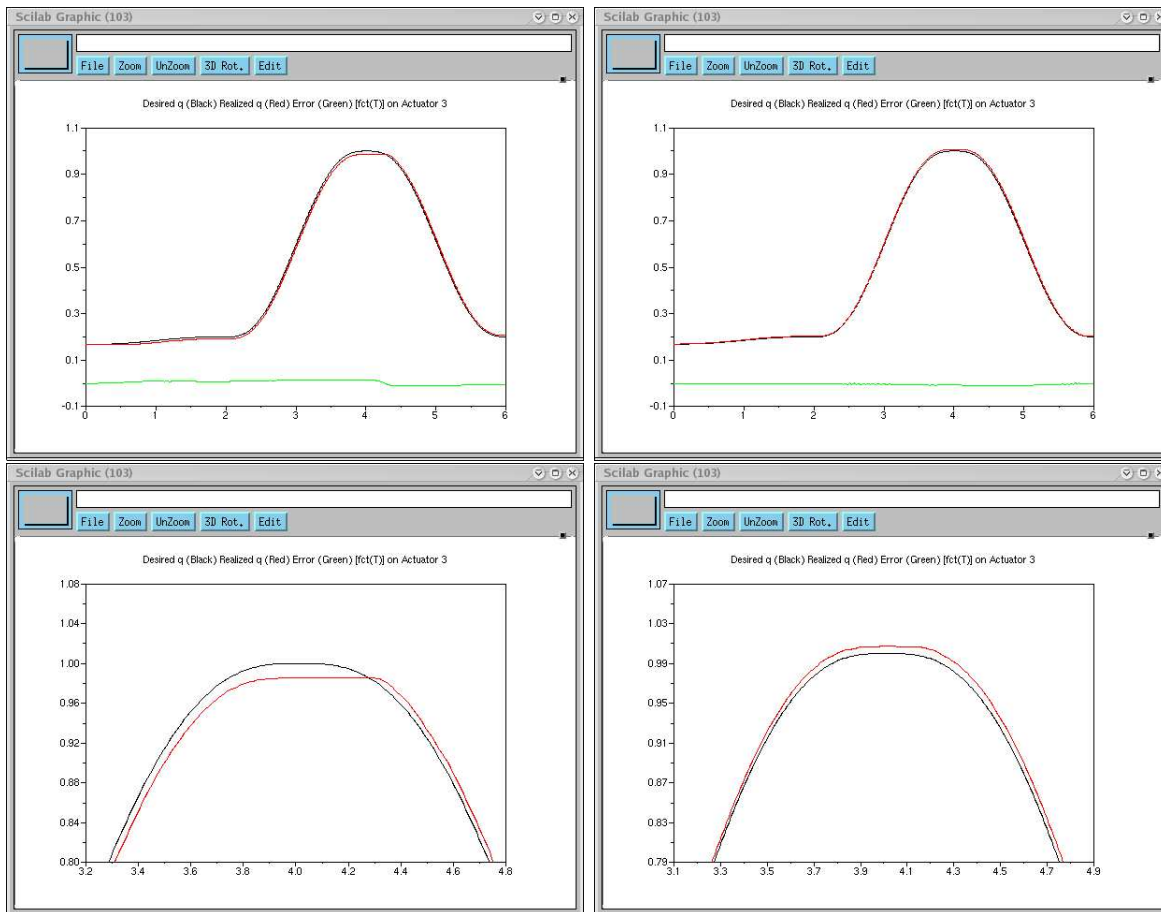


FIG. 5.9 – Suivi de trajectoire : trajectoire désirée (noir), trajectoire réalisée (rouge), erreur (vert) sur le genou. A gauche, sans compensation de frottement, à droite avec la compensation estimée. En bas, un zoom est fait pour mieux apprécier l'erreur.

Le genou n'est pas l'articulation la plus sujette au frottement (contrairement aux chevilles), c'est pourquoi l'amélioration, bien que réelle (plus d'erreur de traînage, et diminution de l'erreur maximale), est peu visible. De plus, un réglage plus fin des gains peut être réalisé pour obtenir de meilleurs résultats. Des expérimentations sont encore en cours. Il est néanmoins intéressant de remarquer sur la figure 5.9 en bas à gauche un effet classique du frottement qu'est le collage qui empêche de rejoindre la courbe de référence, et donne cette impression de retard de poursuite.

5.5 Conclusion

Le frottement sur BIP est un phénomène difficile à modéliser en utilisant les modèles existants (statiques ou dynamiques). Nous avons choisi de ne pas le modéliser et d'opter pour une solution de compensation sans modèle basée sur un observateur de forces-perturbations. Cette approche nous a permis de mettre en évidence non seulement les frottements, mais également d'autres effets étranges. Dans [1], l'auteur exprime le frottement en fonction du temps et utilise un processus adaptatif pour le compenser. Ici, nous avons mis en avant le fait que le frottement de BIP était fonction de la position. En ce sens c'est une représentation du frottement tout à fait originale que nous avons suggéré et mis en évidence.

Nous avons également pu comparer les résultats d'un observateur dynamique par rapport à ceux d'un estimateur statique. Le fait de pouvoir régler une dynamique d'observation nous donne un degré de liberté supplémentaire dans l'estimation. Ce type d'observateur prenant en compte le modèle dynamique du robot nous a également permis de vérifier la justesse du modèle que nous avons, car les forces identifiées (et non intégrées au modèle actuel de BIP) sont des forces de frottements, et quelques autres effets non linéaires.

5.6 Perspectives

Les perspectives à court terme sont de placer plus finement les pôles de notre estimateur pour améliorer davantage le suivi. Pour cela nous devons approfondir le problème de la stabilité de notre observateur mais également du système bouclé. Nous pouvons également, à partir de l'estimation des frottements par les moindres carrés, inclure à la dynamique du robot un modèle de frottement de Coulomb et visqueux, puis utiliser l'estimateur uniquement pour évaluer les effets non linéaires. Cela permettra de limiter l'importance de l'estimateur, le but n'étant pas de tout compenser par estimation mais de modéliser le plus intelligemment possible BIP et de n'utiliser l'estimateur-compensateur que pour les effets complexes à modéliser.

Cet observateur peut alors également servir à affiner le modèle du robot. En effet, on peut tout à fait envisager de régler le plus finement possible le modèle de façon à obtenir une estimation de perturbation quasi-nulle.

Pour écrire cet observateur, nous avons fait l'hypothèse que $\dot{\tilde{d}} = 0$, or ce n'est pas le cas lorsque l'on parle de frottements car à vitesse nulle, la discontinuité fait que la dérivée est infinie. Ainsi, il peut être intéressant de le modifier en changeant l'hypothèse de départ (par exemple : $\ddot{\tilde{d}} = 0 \dots$) afin d'observer les améliorations que cela peut apporter et le rendre ainsi plus robuste aux hautes fréquences. Une étude approfondie du retard qu'introduisent les pôles peut être réalisée, ainsi que sur la technique de discrétisation.

On peut également imaginer réaliser un nouveau modèle de frottement pour BIP (en tenant compte de la géométrie des transmissions...), qui intégrerait le fait qu'il soit fonction de la position.

Annexe F

Observateur de perturbation

F.1 Etude de la commandabilité et de l'observabilité

Le système augmenté (prenant en compte la perturbation telle que $\dot{d} = 0$ et les incertitudes du modèle) tel que nous l'avons décrit se présente sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} \end{cases} \quad (\text{F.9})$$

La paire (A,B) est complètement commandable si et seulement si :

$$\text{rang} \left[\tilde{B}_0 \mid \tilde{A}_0 \tilde{B}_0 \mid \tilde{A}_0^2 \tilde{B}_0 \right] = \dim(\tilde{A}_0) = 3$$

La paire (A,C) est complètement observable si et seulement si :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \tilde{C}_0 \\ \tilde{C}_0 \tilde{A}_0 \\ \tilde{C}_0 \tilde{A}_0^2 \end{bmatrix} = \dim(\tilde{A}_0) = 3$$

Commandabilité

On applique la définition de commandabilité à notre système, et on obtient :

$$\text{rang} \left[\tilde{B}_0 \mid \tilde{A}_0 \tilde{B}_0 \mid \tilde{A}_0^2 \tilde{B}_0 \right] = \text{rang} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 2 \quad (\text{F.10})$$

Le système n'est pas complètement commandable.

Observabilité

On applique la définition d'observabilité à notre système, et on obtient :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \tilde{C}_0 \\ \tilde{C}_0 \tilde{A}_0 \\ \tilde{C}_0 \tilde{A}_0^2 \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3 \quad (\text{F.11})$$

Le système est complètement observable.

Ce résultat nous permet de dire que l'on peut réaliser un observateur d'ordre minimal de dimension 2.

F.2 Résultats des simulations Matlab/Simulink

Ici, nous présentons quelques uns des résultats obtenus sous Matlab/Simulink. Ces résultats ont pour objectif de valider le principe d'observation et de compensation sur un cas idéal. Sur les figures qui suivent, on trace en violet la trajectoire à suivre ou la perturbation générée et en jaune le suivi réellement réalisé ou la perturbation estimée par notre observateur. Sur la figure F.1, nous présentons le suivi de trajectoire lorsque le système n'est pas perturbé. (le régulateur qui assure ce suivi a été conçu de manière très approximative)

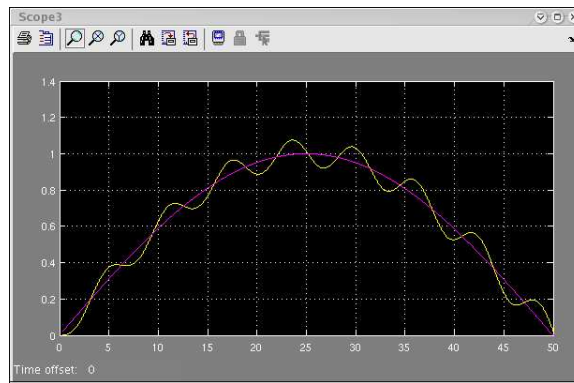


FIG. F.1 – Suivi de trajectoire sans perturbation

Si on ajoute une perturbation de type rampe + sinus + frottement de Coulomb et visqueux, on obtient le suivi de la figure F.2 et l'observation de la figure F.3 (dans ce cas là, on ne reboucle pas l'estimé).

On voit bien que le suivi n'est plus du tout correct. On utilise donc la perturbation estimée que l'on reboucle sur la commande. On a alors (figure F.4) :

On remarque alors que le résultat obtenu est très similaire à celui de la figure F.1, sans perturbation. Ainsi, ces courbes valident le fonctionnement global de la méthode de compensation basée sur observateur.

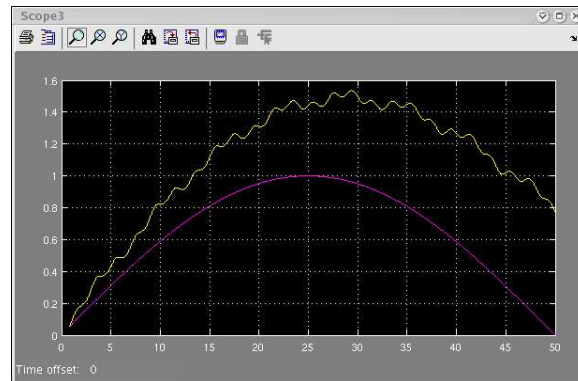


FIG. F.2 – Suivi de trajectoire avec perturbation

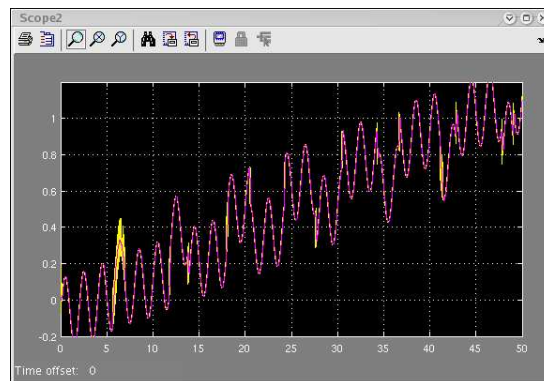


FIG. F.3 – Observation de la perturbation

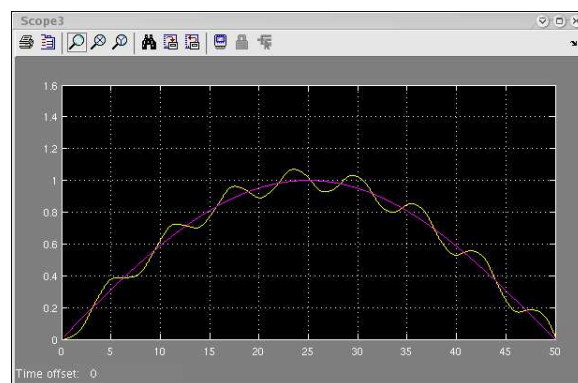


FIG. F.4 – Suivi de trajectoire avec un rebouclage de la perturbation estimée sur la commande

Estimation financière

Dans cette partie, nous dressons la liste du matériel et des ressources qui ont été nécessaires à la réalisation de mon stage à l'INRIA. Pour chacune d'elles, nous donnons une estimation financière (en euros).

- **Ressources mobilisées : Robot BIP**
 - Mécanique (100 000 euros)
 - Electronique de puissance, moteurs et capteurs (30 000 euros)
 - Ordinateur de commande (2 500 euros)
- **Ressources informatiques**
 - Ordinateur personnel connecté à internet et au réseau local (1 500 euros)
 - Imprimantes et consommables (1 500 euros)
 - Vidéo projecteur (1 000 euros)
- **Ressources intellectuelles**
 - Livres et ouvrages scientifiques en libre accès à la bibliothèque de l'INRIA (une dizaine de livres)
- **Ressources générales**
 - Locaux, administrations, cafétéria, fournitures (15 000 euros)
- **Ressources perçues**
 - Indemnités de stage sur les cinq mois (2 875 euros et 2 500 de charges)

Soit environ 160 000 euros. Bien évidemment, ces ressources n'ont pas été mobilisées uniquement pour moi. Dans cette estimation financière je ne prend pas en compte le temps que certaines personnes ont passé avec moi et qui représente une ressource humaine, donc un coût pour l'entreprise.

Conclusion et Perspectives

L'objectif de ce stage était d'améliorer le suivi de trajectoire de BIP en travaillant sur la compensation des frottements qui apparaissent dans les actionneurs qui le composent.

Dans ce contexte, j'ai étudié le modèle du robot, les commandes en robotique, le problème de la prise et perte de contact caractéristique des bipèdes et le frottement (phénomènes, modèles et techniques de compensations). L'étude du frottement a permis de mettre en évidence plusieurs méthodes de compensation. Parmi elles, deux approches ont été explorées expérimentalement :

- La première, basée sur un *modèle statique*, en me concentrant sur un point essentiel : la manière dont est calculée la vitesse. Ainsi, j'ai proposé un observateur de vitesse plutôt qu'une résolution d'équations aux différences et mis en évidence sur le simulateur HuMAnS l'efficacité de cette méthode.
- Dans la seconde approche, une méthode de *compensation sans modèle* basée sur un observateur de forces-perturbations a été développée. Cette méthode a permis de mettre en évidence le fait original que le frottement sur BIP est fonction de la position. Cette approche a ensuite été implantée avec succès sur le bipède.

L'estimateur de vitesse devrait être implanté sur BIP dans la dernière partie de mon stage. En ce qui concerne la compensation sans modèle, les résultats obtenus doivent encore être approfondis mais il n'en demeure pas moins qu'ils sont encourageants pour la suite. L'estimateur pourra également permettre d'affiner nos connaissances du robot pour aboutir à un modèle plus précis.

En ce sens, l'objectif du stage a été atteint puisque nous avons réussi à mettre en évidence les phénomènes de frottement et à les compenser sur un axe. Il reste cependant beaucoup à faire pour que cela fonctionne sur toutes les articulations du robot. De nombreux autres problèmes ont été mis en évidence ce qui ouvre de nouvelles perspectives d'études sur BIP.

Sur le plan personnel, ce stage m'a permis d'affirmer mon goût pour l'ingénierie et de découvrir la recherche. Ce stage m'a motivé à m'orienter vers une thèse dans le domaine de l'automatique et de l'informatique temps réel.

Bibliographie

- [1] M. Alamir. On friction compensation without friction model. *Laboratoire d'Automatique de Grenoble*, -.
- [2] K.E. Arzén. *Real-Time Control Systems*. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, 2003.
- [3] K.J. Astrom and B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Prentice Hall, 2002.
- [4] C. Azevedo and N. Andreff. étude expérimentale des premières démarches du robot bip2000. Rapport de recherche 4017, INRIA Rhône-Alpes, 2000.
- [5] C. Azevedo and R. Pissard-Gibollet. Le contrôleur du robot bip2000. Rapport technique 0249, INRIA Rhône-Alpes, 2001.
- [6] J.M. Bourgeot. *Contribution à la commande de systèmes mécaniques non-réguliers*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [7] M. Le Borgne C. Samson and B. Espiau. *Robot Control, The task function approach*. Oxford science, 1991.
- [8] S. Chareyron and P.B. Wieber. Stability and regulation of non-smooth dynamical systems. Rapport de recherche 5408, INRIA Rhône-Alpes, 2004.
- [9] W-H Chen, D.J. Ballance, P.J. Gawthrop, and J. O'Reilly. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulator. *IEEE Transaction on industrial electronics vol 40 no 2*, april 1993.
- [10] C. Canudas de Wit H. Olsson K.J. Astrom and P. Lischinsky. A new model for control of systems with friction. *IEEE Transaction on Automatic Control vol.40*, 1995.
- [11] H. Olsson K.J. Astrom C. Canudas de Wit M.Gafvert P. Lischinsky. Friction models and friction compensation. *European Journal of Control and IEEE Transactions on Control Applications*, 1998 and 2000.
- [12] Y. Wang Z. Xiong H. Ding and X. Zhu. Nonlinear friction compensation and disturbance observer for high-speed motion platform. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- [13] G. Abba et P. Sardain. Modélisation des frottements dans les éléments de transmission d'un axe de robot en vue de son identification. *16ème Congrès français de Mécanique*, 2003.

- [14] M. Gafvert. *Comparison of two Friction Models*. Thesis, Lund University of Technology, 1996.
- [15] M. Gafvert. Comparison of two friction models. *Lund Institute of Technology*, 1998.
- [16] D. Georges. *Modélisation et commande des systèmes électro-hydro-mécaniques - Application à la robotique*. Cours de quatrième année ESISAR, 1997.
- [17] B. Armstrong Hérouvry. *Control of Machines with Friction*. Kluwer Academic, 1991.
- [18] K. Kaneko F. Kanehiro S. Shuuji H. Hirukawa T. Kawasaki M. Hirata and T. Isozumi. Humanoid robot hrp2. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2004.
- [19] M. Janiec. Friction compensation by the use of friction observer. Master thesis, Lund Institute of Technology, 2004.
- [20] S. Jardé. Mise en oeuvre de commandes avancées sur le robot bip. Rapport de stage d'ingénieur, École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2002.
- [21] Q. Hua Xia S. Yong Lim M. H. Ang Jr and T. Ming Lim. Adaptive joint friction compensation using a model-based operational space velocity observer. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- [22] W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, Identification and Control of Robots*. Hermes Penton Science, 2002.
- [23] S-W. Lee and J-H. Kim. Robust adaptive stick-slip friction compensation. *IEEE Transactions on industrial electronics vol. 42 no. 5*, 1995.
- [24] M.R. Kermani M. Wong R.V. Patel M. Moallem and Ostojic. Friction compensation in low and high-reversla-velocity manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- [25] D. Putra L. Moreau and H. Nijmeijer. Observer-based compensation of discontinuous friction. *Eindhoven University of Technology*, 2001.
- [26] T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi. Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator. *IEEE Transaction on industrial electronics vol 40 no 2*, april 1993.
- [27] B. Armstrong D. Neevel and T. Kusik. New results in npid control : tracking, integral control, friction compensation and experimental results. *Department of Electrical and Computer Science UW Milwaukee*, -.
- [28] D. Putra H. Nijmeijer and N. van de Wouw. Analysis of undercompensation and overcompensation friction in 1-dof mechanical systems. *Submitted to Automatica*, 2005.
- [29] J.J. Parmentier. Contribution à la commande d'un robot bipède. Rapport de stage, École Polytechnique, 1999.
- [30] S.C. Southward C.J. Radcliffe and C.R. MacCluer. Robust nonlinear stick-slip friction compensation. *Journal of Dynamic Systems, Measurment, and Control*, 1991.
- [31] Q.P. Ha A. Bonchis D.C. Rye and H.F. Durrant-Whyte. Variable structure systems approach to friction estimation and compensation. *University of Sydney*, 2005.

- [32] L. Sciavicco and B. Siciliano. *Modeling and Control of Robots Manipulators*. Springer, 1999.
- [33] K. Ohnishi M. Shibata and T. Murakami. Motion control for advanced mechatronics. *IEEE/ASME transactions on mechatronics vol.1*, 1996.
- [34] J-H. Ryu J. Song and D-S. Kwon. A nonlinear friction compensation method using adaptive control and its practical application to an in-parallel actuated 6-dof manipulator. *Control Engineering Practice 9*, 2001.
- [35] S. Lohmeier K. Loffer M. Gienger H. Ulbrich and F. Pfeiffer. Computer system and control of biped "johnnie". *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2004.
- [36] N. van de Wouw N. Mallon and H. Nijmeijer. Friction compensation in a controlled one-link robot using a reduced-order observer. *Eindhoven University of Technology*, -.
- [37] P.B. Wieber. *Modélisation et commande d'un robot marcheur anthropomorphe*. Thèse de doctorat, École National Supérieure des Mines de Paris, 2000.
- [38] P.B. Wieber. Documentation du simulateur. Document interne, INRIA Rhône-Alpes, 2003.
- [39] http://www.amm.mw.tum.de/index_e.html.
- [40] <http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/>.
- [41] http://www.kawada.co.jp/global/ams/hrp_2.html.
- [42] <http://world.honda.com/ASIMO/>.
- [43] <http://www.inria.fr/>.
- [44] <http://www.lag.ensieg.inpg.fr/canudas/>.
- [45] <http://www.control.lth.se>.

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDE

ESISAR 2004/2005

Mots clés :

MODÉLISATION ET COMMANDE DE ROBOTS BIPÈDES, MODÉLISATION ET COMPENSATION DE FROTTEMENTS, ESTIMATION DE VITESSE ET DE FORCES-PERTURBATIONS.

Résumé :

Du fait que les mouvements que peut accomplir un bipède sont limités, son équilibre est sans cesse remis en cause. Une approche innovante, développée par Pierre-Brice Wieber, basée sur la notion de mouvements réalisables, consiste à générer une trajectoire de référence qui assure la stabilité à tous moments. La loi de commande qui doit permettre de réaliser ce suivi est biaisée par le frottement qui apparaît dans les articulations. C'est sur ce point que nous nous attardons plus particulièrement.

Après avoir introduit la modélisation dynamique et les commandes actuellement développées sur le robot BIP (robot anthropomorphe comportant 15 articulations actionnées), une étude bibliographique nous permet de proposer plusieurs techniques afin de compenser les frottements et améliorer le suivi de trajectoire.

Une approche expérimentale par observateurs de vitesse et de perturbations est implémentée sur le robot BIP. Elle met en avant ces phénomènes de frottements et permet de les compenser.

Key words :

MODELLING AND CONTROL OF BIPEDAL ROBOTS, FRICTION MODELLING AND COMPENSATION, SPEED AND FORCES-DISTURBANCES ESTIMATION.

Abstract :

The bipedal robot achievable movements are limited, therefore the equilibrium is hard to ensure. A new approach, developed by Pierre-Brice Wieber, based on practicable movements, consists in generating a trajectory that ensures the stability at any time. The control law which must make the tracking possible is skewed by the joint's friction. It is on this point that we are more particularly spending time.

After introducing the dynamical model and the actuals BIP's control laws (anthropomorphic robot having 15 actuated joints), a study leads us to propose some friction compensation methods to improve the trajectory tracking.

A speed and disturbance observer-based experimental approach is implemented on BIP. Friction phenomenas are highlighted and this method allows to compensate them.