POLYPUBLIE

Contrôle coopératif de bras manipulateurs

Arthur Prévot

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2004
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/7200/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Prévot, A. (2004). Contrôle coopératif de bras manipulateurs [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7200/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Richard Gourdeau, & Jean-Claude Piedboeuf
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI®

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONTRÔLE COOPÉRATIF DE BRAS MANIPULATEURS

ARTHUR PRÉVOT
DÉPARTEMENT DE DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
AVRIL 2004

© Arthur Prévot, 2004.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisisitons et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-91964-1
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-91964-1

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou aturement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CONTRÔLE COOPÉRATIF DE BRAS MANIPULATEURS

présenté par: PRÉVOT Arthur

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. DESANTIS Romano, Ph.D., président

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PIEDBOEUF Jean-Claude, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. AGHILI Farhad, Ph.D., membre

À la famille, aux amis,

et à tous ceux qui se sentent concernés

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mes directeurs de recherche, Richard Gourdeau et Jean-Claude Piedboeuf pour avoir fait de ma maîtrise un moment enrichissant et intense, et pour m'avoir soutenu financièrement. Merci donc à Richard Gourdeau pour la supervision technique, pour m'avoir permis de goûter à l'enseignement, et pour avoir toléré le temps passé dans les associations étudiantes. Merci aussi à Jean-Claude Piedboeuf pour m'avoir donné la chance de travailler sur un très beau projet, dans un environnement stimulant, au sein de l'Agence Spatiale Canadienne.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé au niveau technique tout au long de mon projet. Merci donc à Romano DeSantis pour m'avoir appris la plupart des concepts importants nécessaires à la poursuite de mon projet, et pour l'approche pédagogique. À l'agence, je remercie Farhad Aghili pour la supervision technique du projet. Je remercie aussi les multiples collaborateurs qui sont intervenus à tous les moments clés, à savoir entre autre Brian Moore pour le support Symofros, Yves Gonthier pour l'implémentation sous Simulink, Michel Doyon pour l'intégration temps réel, Wen-Hong Zhu pour les explications divines sur le control en force, Erick Dupuis pour la disponibilité et l'écoute, et Sébastien Gemme pour les voyages au métro Longueuil, et pour les discussions.

Je remercie aussi tous les collègues de la vie de tous les jours autant à Polytechnique, à l'AÉCSP notamment, qu'à l'extérieur. Le travail de maîtrise n'aurait probablement pas été aussi efficace si je n'avais pas été autant impliqué dans des activités parascolaires. Merci enfin aux proches qui voient la robotique comme un domaine mystérieux, et qui se demandent pourquoi il faut autant de temps et de préparation pour faire bouger un robot.

RÉSUMÉ

La coordination entre plusieurs manipulateurs permet d'étendre le nombre de tâche qu'un système robotique peut effectuer. Pour la Station Spatiale Internationale, une loi de commande efficace du système multi-robot permettrait de minimiser le nombre de sorties extravéhiculaires. Dextre, un système de deux bras robotiques comportant 7 degrés de liberté par bras, sera lancé en 2006 pour complémenter le Canadarm II. Cependant, ce système devrait avoir des performances satisfaisantes en mode coopératif.

Ce projet de recherche vise à développer et à implémenter une loi de commande décentralisée pour le maintien rigide par le système multi-robot d'un objet commun. La loi de commande proposée permet le contrôle de la position de l'objet, de la force interne à l'objet, et de la force externe appliquée par l'objet sur l'environnement. Cette possibilité d'appliquer une force sur l'environnement est nouvelle et pourrait permettre, par exemple, d'utiliser les deux bras pour retirer une batterie bloquée. L'expérimentation est effectuée sur le CART (« CSA Automation and Robotics Testbed »), un système similaire à Dextre. La commande de systèmes multi-manipulateur repose sur le contrôle en force à cause de la configuration en chaîne fermée. Le schéma de commande proposé est basé sur la commande par impédance pour la force interne, et sur la commande hybride par impédance pour la force externe. La commande par impédance établit un lien entre la force et la vitesse, et permet ainsi d'avoir un contact stable avec l'environnement. La commande hybride par impédance permet de changer l'impédance désirée pour que la force converge vers sa valeur désirée. Le schéma dépend aussi de la commande en position gérée par le couple pré-calculé, car de faibles erreurs de suivi en position peuvent résulter en de larges forces internes. Cette loi de commande est basée sur un projet conduit par une équipe de Bombardier dans le cadre d'un contrat de

recherche et développement avec l'ASC.

Ce mémoire présente la modélisation du système multi-robot, le calcul de la force interne et externe, et la loi de commande. La validité de la loi de commande est illustrée sur un modèle entièrement simulé. Ensuite, l'expérimentation est analysée. Le scénario consiste à prendre un objet posé sur une table, à le manipuler, et à appliquer une force désirée sur l'environnement.

ABSTRACT

Coordination between manipulators extends the range of possible tasks of robotics systems by providing more dexterity. For the International Space Station, efficient multi-robot control schemes should minimise the number of extra-vehicular-activities. Dextre, a dual-arm robotic system made of seven degrees of freedom arms, will be launched in 2006 to complement the Canadarm II. However, this system should have satisfactory dual-arm cooperation capability.

This research project aims at developing and implementing a decentralized control law for multi-manipulator systems rigidly holding a common object. The proposed scheme allows to control the object position, the internal force on the object and the external force exerted by the object on the environment. This capacity of applying a force on the environment is new and will permit, for example, the utilisation of both Dextre arms to remove a jammed Battery Box. Experiments are carried out on the CSA Automation and Robotics Testbed (CART), a system similar to Dextre. The control of multi-manipulator systems relies on force control because of the closed chain configuration. The proposed scheme is based on impedance control for the internal force, and on hybrid impedance control for the external force. Impedance control enforces a relationship between force and velocity, thus allowing a stable contact with the environment. The hybrid impedance control allows changing the desired impedance for the external force to converge to the desired one. The scheme also relies on position control using resolved acceleration control since small tracking errors can result in large internal forces. This control law is based on previous work carried out by a Bombardier led team under a R&D contract.

This thesis presents the multi-robot system model, the internal force and external force computation, and the control scheme. A simulated dual arm system is deve-

loped to validate the concept. Then, the experiments are analysed. The scenario consists of grabbing an object, manipulating it, and applying a desired force to the environment.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES x

LISTE DES FIGURES xv

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES xviii

LISTE DES TABLEAUX xxiii

LISTE DES ANNEXES xxiv

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 3

1.1 Introduction 3

1.2 Stratégies de commande multi-robot 4

1.2.1 Approche centralisée 4

1.2.2 Approche décentralisée 5

1.2.3 Approche décentralisée maître-esclave 6

1.3 Commande en force 7

1.3.1 Décomposition force interne et force externe 7

1.3.2 Approche hybride position/force 9

1.3.3 Approche par impédance 10

1.4 Stratégies de commande mono-robot transposées au cas multi-robot 12
1.5 Domaines connexes 13
1.6 Conclusion 14

CHAPITRE 2 MODÈLE DYNAMIQUE 16
2.1 Introduction 16
2.2 Modèle dynamique du système 16
2.2.1 Modèle dynamique du système en chaîne ouverte 16
2.2.2 Modèle dynamique du système en chaîne fermée 20
2.2.3 Discussion sur le nombre de degrés de liberté selon la configuration du système 21
2.2.4 Définition de la jacobienne de l'objet J_o 23
2.3 Modèle statique des forces appliquées à l'objet 26
2.3.1 Calcul de la force de contact avec l'environnement 26
2.3.2 Décomposition des forces aux points de prise 28
2.3.2.1 Démonstration des expressions f_{mouv} et f_{int} 29
2.3.2.2 Propriété des opérateurs de projection 30
2.3.2.3 Calcul de la pseudo-inverse $J_o^{T\dagger}$ 30
2.3.3 Cas de deux robots 31
2.3.3.1 Démonstration de l'expression F_{int} 32
2.3.3.2 Démonstration de l'expression F_{mouv} 33
2.4 Transfert de paramètres cinématiques en différents points de l'objet 34

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE LA LOI DE COMMANDE . . . 36
3.1 Introduction 36
3.2 Calcul des forces et de la cinématique de l'objet 36
3.3 Commande en force externe 39
3.3.1 Formulation de la commande par impédance 39

3.3.1.1 Détail mathématique de l'effet combiné d'une position et une force désirée 42
3.3.2 Formulation de la commande hybride par impédance 45
3.3.2.1 Détail mathématique de l'effet combiné d'une position et une force désirée avec μ_x et μ_f 46
3.3.2.2 Utilisation des variables de sélection par l'opérateur 47
3.4 Distribution des commandes aux deux bras 48
3.4.1 Distribution des paramètres cinématiques vers les points de prise 48
3.4.2 Distribution des forces internes aux bras 49
3.5 Commande en force interne 49
3.6 Commande en position dans l'espace cartésien 51
3.7 Linéarisation de la dynamique 52
3.8 Discussion sur la loi de commande 53
3.8.1 Formulation globale et stabilité 53
3.8.2 Approche de Bonitz pour la commande par impédance . . . 54

CHAPITRE 4 SIMULATION 56
4.1 Introduction 56
4.2 Description du système 57
4.2.1 Topologie du système 57
4.2.2 Description de l'environnement 57
4.2.3 Environnement de programmation 58
4.3 Développements 59
4.3.1 Modélisation du système 59
4.3.2 Modélisation de la commande 60
4.3.3 Machine à état fini 60
4.3.4 Génération de trajectoire 61

4.3.5 Visualisation et animation 63
4.3.6 Dérive numérique 64
4.3.7 Dérivation numérique 64
4.3.8 Boucle algébrique 65
4.4 Validation 66
4.4.1 Validation de la cinématique 66
4.4.2 Validation de la dynamique 66
4.4.3 Validation de la commande 67
4.5 Conditions de simulation 68
4.5.1 Définition du scénario 68
4.5.2 Choix des gains 69
4.6 Résultats de simulation 70
4.6.1 Commande en position 70
4.6.2 Commande de la force interne 71
4.6.3 Commande de la force externe 72
4.7 Conclusions 75

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION 76
5.1 Introduction 76
5.2 Description du système 76
5.2.1 Topologie du système 76
5.2.2 Description de l'environnement 78
5.2.3 Environnement de programmation 79
5.2.3.1 Matériel 79
5.2.3.2 Logiciel 79
5.3 Développements 80
5.3.1 État de développement au début du projet 80
5.3.2 Implémentation des contrôleurs au niveau des bras 83

5.3.3 Implémentation du coordonnateur 83
5.3.4 Implémentation de la console 84
5.3.5 Outils divers 85
5.3.6 Implémentation temps réel 85
5.4 Validation 86
5.5 Conditions d'expérimentation 87
5.5.1 Définition du scénario 87
5.5.2 Choix des gains 88
5.6 Résultats d'expérimentation 89
5.6.1 Commande en position 90
5.6.1.1 Avec commande par impédance 90
5.6.1.2 Sans commande par impédance 91
5.6.2 Commande de la force interne 93
5.6.2.1 Avec commande par impédance 93
5.6.2.2 Sans commande par impédance 93
5.6.3 Commande de la force externe 94
5.6.3.1 Avec commande par impédance 94
5.6.3.2 Sans commande par impédance 96
5.7 Comparaison aux travaux de Bombardier 97
5.8 Amélioration des performances 97
5.8.1 Axes de développement 97
5.8.2 Axes de recherche 98
5.9 Conclusions 100

CONCLUSION 101

RÉFÉRENCES 103

ANNEXES 107

LISTE DES FIGURES

FIG. 2.1	Système en chaîne ouverte	17
FIG. 2.2	Système en chaîne fermée	20
FIG. 2.3	Jacobienne de l'objet pour la détermination des vitesses	24
FIG. 2.4	Jacobienne de l'objet pour la détermination des forces	25
FIG. 2.5	Bilan des forces appliquées à l'objet	26
FIG. 2.6	Bilan des forces appliquées à l'objet à l'équilibre	27
FIG. 2.7	Décomposition des forces appliquées à l'objet	28
FIG. 2.8	Transfert de la cinématique du centre de masse de l'objet vers les points de prise	34
FIG. 3.1	Loi de commande	37
FIG. 3.2	Entrées et sorties du calcul des forces	38
FIG. 3.3	Entrées et sorties de la gestion des forces externes	40
FIG. 3.4	Commande par impédance simplifiée en 1D	43
FIG. 3.5	Entrées et sorties de la distribution des commandes	48
FIG. 3.6	Entrées et sorties de la gestion des forces internes	50
FIG. 3.7	Modification de la trajectoire aux points de prise pour la régulation des forces internes	51
FIG. 3.8	Entrées et sorties de la commande en position	51
FIG. 3.9	Entrées et sorties de la linéarisation de la dynamique	52
FIG. 3.10	Approche de Bombardier vs Bonitz	55
FIG. 4.1	Topologie du système	58
FIG. 4.2	Scénario	69
FIG. 4.3	Positions/orientations de l'objet réelles (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), et erreur en positions/ orientations, dynamique connue	71

FIG. 4.4 Positions/orientations de l'objet réelles (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), et erreur en positions/orientations, dynamique incertaine 72
FIG. 4.5 Forces/moments internes à l'objet, réels (-) et désirés (--), dynamique connue 73
FIG. 4.6 Forces/moments internes à l'objet, réels (-) et désirés (--), dynamique incertaine 73
FIG. 4.7 Forces/moments externes à l'objet réels (-) et désirés (--), dynamique connue 74
FIG. 4.8 Forces/moments externes à l'objet réels (-) et désirés (--), dynamique incertaine 74
FIG. 5.1 Photo du système expérimental CART 77
FIG. 5.2 Référentiels des joints pour STM1 78
FIG. 5.3 Référentiels des joints pour STM2 78
FIG. 5.4 Ajout à l'architecture existante 82
FIG. 5.5 Erreurs en positions/orientations selon y de STM2, cas avec impédance 91
FIG. 5.6 Positions/orientations selon x de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), cas avec impédance 92
FIG. 5.7 Erreurs en positions/orientations selon x de l'objet, cas avec impédance 92
FIG. 5.8 Positions/orientations selon x de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), cas sans impédance 92
FIG. 5.9 Erreurs en positions/orientations selon x de l'objet, cas sans impédance 93
FIG. 5.10 Forces/moments internes, selon y et x respectivement, mesurés (-) et désirés (--) de STM2, cas avec impédance 94

FIG. 5.11 Forces/moments internes, selon y et x respectivement, mesurés (-) et désirés (--) de STM2, cas sans impédance 94
FIG. 5.12 Forces/moments, selon x, externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--), cas avec impédance 95
FIG. 5.13 Forces/moments externes à l'objet, selon x, mesurés (-) et désirés (--), cas sans impédance 96
FIG. I.1 Positions/orientations de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.) 107
FIG. I.2 Erreurs en positions/orientations de l'objet 108
FIG. I.3 Forces/moments externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--) 109
FIG. I.4 Erreurs en positions/orientations de STM1 110
FIG. I.5 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM1 111
FIG. I.6 Erreurs en positions/orientations de STM2 112
FIG. I.7 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM2 113
FIG. II.1 Positions/orientations de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.) 114
FIG. II.2 Erreurs en positions/orientations de l'objet 115
FIG. II.3 Forces/moments externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--) 116
FIG. II.4 Erreurs en positions/orientations de STM1 117
FIG. II.5 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM1 118
FIG. II.6 Erreurs en positions/orientations de STM2 119
FIG. II.7 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM2 120

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

Symboles liés à un robot

τ_i = Vecteur de couple des joints du i^e robot

M_i = Matrice d'inertie du i^e robot

h_i = Vecteur contenant la friction, la gravité, l'accélération centripète, et de Coriolis du i^e robot

J_i = Matrice Jacobienne du i^e robot

q_i = Vecteur de position des joints du i^e robot

f_i = Forces et moments exercés par l'outil du i^e robot sur l'environnement

Symboles liés à un ensemble de k robots

$\tau = [\tau_1 \dots \tau_k]^T$

$M = diag(M_i)$ symétrique définie positive

$h = [h_1 \dots h_k]^T$

$J = diag(J_i)$

$q = [q_1 \dots q_k]^T$

$f = [f_1 \dots f_k]^T$

Symboles liés à l'objet

M_o = Masse de l'objet, matrice symétrique définie positive

h_o = Vecteur non linéaire lié à l'objet

p_i = $[p_{ix} \quad p_{iy} \quad p_{iz}]^T$ Distance entre le i^e point de prise et le centre de masse de l'objet

J_{oi} = Matrice Jacobienne de l'objet pour le i^e point de prise

J_o = $[J_{o1} \dots J_{ok}]^T$ Matrice Jacobienne de l'objet

g = Constante de gravitation universelle

f_{oi} = Forces et moments exercés par l'environnement sur l'objet et appliqués au i^e point de prise

f_o = $[f_{o1} \dots f_{ok}]^T$

F_{env} = Forces et moments exercés par l'environnement sur l'objet et appliqués au centre de masse de l'objet

F_{net} = Forces et moments exercés par les robots sur l'objet

F_{mouv} = Forces et moments appliqués au centre de masse de l'objet induisant un mouvement de l'objet

F_{int} = Forces et moments internes à l'objet appliqués au centre de masse de l'objet

f_{mouv} = $[f_{mouv1} \dots f_{mouvk}]^T$ Forces et moments appliqués aux points de prise induisant un mouvement de l'objet

f_{int} = $[f_{int1} \dots f_{intk}]^T$ Forces et moments internes à l'objet appliqués aux points de prise

f_{env} = Forces et moments exercés par l'environnement sur l'objet et appliqués à l'endroit du capteur de force

$x_{o\chi}$ = $[x_{o\chi x} \quad x_{o\chi y} \quad x_{o\chi z}]^T$ Position de l'objet
dans le référentiel « Monde »

$x_{o\xi}$ = $[x_{o\xi\alpha} \quad x_{o\xi\beta} \quad x_{o\xi\gamma}]^T$ Orientation de l'objet
dans le référentiel « Monde »

ν_o = $[\dot{x}_{o\chi x} \quad \dot{x}_{o\chi y} \quad \dot{x}_{o\chi z}]^T$ Vitesse linéaire de l'objet
dans le référentiel « Monde »

ω_o = $[\omega_{ox} \quad \omega_{oy} \quad \omega_{oz}]^T$ Vitesse angulaire de l'objet
dans le référentiel « Monde »

x_o = $[x_{o\chi} \quad x_{o\xi}]^T$ Position linéaire et
angulaire de l'objet dans le référentiel « Monde »

$\dot{x}_o$ = $[\dot{x}_{o\chi} \quad \omega_o]^T$ Vitesse linéaire et
angulaire de l'objet dans le référentiel « Monde »

$\ddot{x}_o$ = $[\ddot{x}_{o\chi} \quad \dot{\omega}_o]^T$ Accélération linéaire et
angulaire de l'objet dans le référentiel « Monde »

x_i = Position linéaire et angulaire du i^e point de
prise dans le référentiel « Monde »

Symboles liés à la commande

M_{des}	=	Matrice de masse désirée pour l'objet
B_{des}	=	Matrice d'amortissement désirée pour l'objet
K_{des}	=	Matrice de souplesse désirée pour l'objet
$\tilde{M}_i$	=	Matrice de masse estimée du i^e robot
$\tilde{h}_i$	=	Vecteur non linéaire estimée du i^e robot
$\tilde{J}_i$	=	Matrice Jacobienne estimée du i^e robot
μ_x	=	Variable de sélection pour la commande en position
μ_f	=	Variable de sélection pour la commande en force
M_{i_des}	=	Matrice de masse désirée pour le i^e robot
B_{i_des}	=	Matrice d'amortissement désirée pour le i^e robot
K_{i_des}	=	Matrice de souplesse désirée pour le i^e robot
K_{i_P}	=	Gain proportionnel du PID pour le i^e robot
K_{i_I}	=	Gain intégral du PID pour le i^e robot
K_{i_D}	=	Gain dérivé du PID pour le i^e robot
x_{o_des}	=	Position et orientation de l'objet désirée
x_{o_imp}	=	Position et orientation de l'objet requise selon l'impédance désirée
x_{i_des}	=	Position et orientation de l'outil du i^e robot désirée
x_{i_imp}	=	Position et orientation de l'outil du i^e robot requise selon l'impédance désirée
x_{i_pid}	=	Position et orientation de l'objet requise par le PID
F_{env_des}	=	Forces et moments désirés à exercés par l'environnement sur l'objet
F_{int_des}	=	Forces et moments internes désirés à appliqués au centre de masse de l'objet
f_{inti_des}	=	Forces et moments internes désirés à appliqués au i^e point de prise

Note 1 : Toutes les forces sont exprimées dans le référentiel « Monde » à moins que

mentionné autrement.

Note 2 : Les paramètres cinématiques liés à l'objet et aux outils des bras manipulateurs sont décrits en utilisant x, $\dot{x}$, et $\ddot{x}$ pour représenter position, vitesse, et accélération. Il s'agit d'une utilisation abusive de notation que est faite afin de simplifier l'écriture. Cependant, il faut prendre un considération que $\dot{x}$ n'est pas la dérivée de x à cause de la nature non linéaire de la loi de propagation du vecteur d'orientation.

LISTE DES TABLEAUX

TAB. 2.1 Nombre de variables du système par rapport au nombre de DLL 21
TAB. 4.1 Paramètres du robot simulé 57
TAB. 4.2 Paramètres de Baumgarte 64
TAB. 5.1 Paramètres de Denavit Hartemberg pour STM1 76
TAB. 5.2 Paramètres de Denavit Hartemberg pour STM2 77

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I GRAPHIQUES EXPÉRIMENTAUX AVEC COMMANDE PAR IMPÉDANCE 107

I.1 Objet 107

I.2 STM1 110

I.3 STM2 112

ANNEXE II GRAPHIQUES EXPÉRIMENTAUX SANS COMMANDE PAR IMPÉDANCE 114

II.1 Objet 114

II.2 STM1 117

II.3 STM2 119

INTRODUCTION

La robotique est un domaine en constante évolution qui trouve des applications dans de nombreux domaines (spatial, automobile, minier, médical, policier, textile, manufacturier...). Il y a donc un vif intérêt pour rendre les robots plus agiles, plus rapides, plus précis, plus autonomes... La robotique a une place de choix dans le domaine spatial pour deux raisons. Elle permet l'exploration de contrées lointaines, tel que Mars par le robot mobile Spirit, avant de prendre le risque d'y envoyer des hommes. Enfin, elle permet de construire et de faire la maintenance de structures dans l'espace, tel que l'ISS (Station Spatiale Internationale) par le bras Canadarm II. Dans cette perspective, un nouveau système, nommé Dextre et constitué de deux bras robotisés, doit rejoindre l'ISS en 2006 pour agir comme une « main » pour Canadarm II. Donner plus de dextérité au bras canadien permettra d'étendre les types de tâches disponibles et donc de minimiser le nombre de sorties extravéhiculaires d'astronautes.

Ce projet de maîtrise, mené à l'Agence Spatiale Canadienne, a pour but de développer et d'implémenter une loi de commande permettant la coopération entre deux bras manipulateurs pour la réalisation d'une tâche. Le système à commander est le CART (« CSA Automation and Robotics Testbed »), un système similaire à Dextre, soit de 2 bras de 7 DLL (degrés de liberté). Ce travail est basé sur un projet conduit par Bombardier Inc (Bombardier, 1999) dans le cadre d'un partenariat avec le milieu universitaire et l'Agence Spatiale Canadienne.

Techniquement, la commande d'un ensemble de robots tenant un même objet présente plusieurs particularités. D'abord, l'action de chacun des robots a une in-

fluence sur les autres. L'ensemble des robots et de l'objet constituent un tout, un système. La commande peut alors être plus ou moins centralisée. Une approche centralisée permet une meilleure connaissance de l'état du système complet alors qu'une approche décentralisée permet de conférer une certaine autonomie à chaque robot et plus de flexibilité dans l'architecture. Enfin, dans un système multi-robot, la commande en force est de première importance car des imprécisions dans la commande de chaque robot peuvent induire des forces internes considérables à l'objet. Différentes approches, tel que la commande hybride position/force ou la commande par impédance, s'offrent à nous. Ces options seront présentées dans la revue de littérature, au chapitre 1.

La commande proposée par Bombardier et reprise en partie dans le cadre de ce projet se base sur une approche décentralisée utilisant la commande par impédance pour la gestion des forces internes et externes à l'objet, et le couple pré-calculé pour la commande en position. Les outils pour la modélisation seront donnés au chapitre 2 et la commande sera présentée au chapitre 3. Ensuite, l'architecture proposée sera d'abord validée, dans le chapitre 4, sur un système simplifié et entièrement simulé de 2 robots planaires de 3 DLL. Enfin, elle sera implémentée sur le CART, dans le chapitre 5, en temps réel et dans un environnement de programmation Matlab/Simulink. L'architecture de contrôle disponible avant le début ou en cours de projet permet de commander séparément chaque bras en choisissant parmi une batterie de contrôleurs, de gérer différentes fonctionnalités (« Hardware in the Loop Simulation », système de vision, station de commande à distance), et de gérer tous les systèmes de sécurité associés. Les développements comprennent donc la création du coordonnateur qui distribue les commandes aux robots, et de contrôleurs non disponibles dans la batterie existante.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La commande d'un ensemble de robot fait intervenir un grand nombre de champs de recherche de la robotique. Étant donnée l'étendue du sujet, l'accent sera mis sur les domaines importants qui permettent de rendre le système opérationnel. Pour chacun des champs d'étude détaillés plus bas, plusieurs approches sont disponibles. La loi de commande choisie pour le système multi-robot dépend alors d'une combinaison de ces approches. Les domaines discutés ici sont les suivants :

- La stratégie de contrôle multi-robot
- La commande en force
- Les schémas de commande mono-robot pouvant s'appliquer pour la commande multi-robot

Les autres domaines de recherche liés à la commande coopérative de robot qui ne sont pas ou peu détaillés sont notamment :

- La gestion de la redondance
- La planification intelligente des tâches
- L'évitement de la collision
- La gestion de la distribution de la charge
- La prise de pièce comportant des degrés de liberté (Ciseaux, piston...)
- La manipulation par des mains agiles
- La gestion du contact rigide et non rigide

1.2 Stratégies de commande multi-robot

Le concepteur de la loi de commande d'un système de robots peut choisir une approche plus ou moins centralisée. Ce choix dépend du contexte dans lequel les robots évoluent. Il conduit à des commandes de plus ou moins haut niveau pour chaque robot, et suppose donc un degré d'autonomie de chaque robot plus ou moins élevé. Dans le cas d'une architecture décentralisée, un autre choix s'offre au concepteur, celui d'une intelligence distribuée plus ou moins uniformément entre les robots. Dans le cas d'une distribution non uniforme, l'approche est appelée maître-esclave.

1.2.1 Approche centralisée

Lorsque l'intelligence est centralisée. Elle distribue des commandes de bas niveau aux robots tel que « Appliquer les couples τ_i aux moteurs des robots » . Cette approche à l'avantage d'être cohérente par rapport au système à commander. En effet, les robots et l'objet interagissent et forment un tout, il est censé de vouloir les commander comme un tout.

Cette approche est mise en application dans (Khatib, 1996) et (Dauchez, 1990). Khatib compare une architecture centralisée à une autre décentralisée dans le cas de bras manipulateurs montés sur des robots mobiles. Il conclut à la supériorité de l'approche décentralisée.

1.2.2 Approche décentralisée

Dans le cas de l'approche décentralisée, l'intelligence est répartie entre les robots. En poussant cette idée à l'extrême, les commandes envoyées aux robot sont des commandes de haut niveau de type « Aller porter un objet à une position x avec une force interne F_{int} et appliquer une force à l'environnement F_{env} avec l'aide d'autres robots » . L'avantage de cette approche est la modularité car il est alors possible d'ajouter des robots autour d'un objet sans changer la structure de la commande. Cette approche permet aussi d'utiliser l'architecture existante de la commande de chaque robot. Cependant, les contrôleurs des robots doivent prendre en compte qu'ils font partie d'un système. Cette approche implique que les robots communiquent ou bien qu'ils interprètent l'action des autres robots par son interaction avec l'objet.

Une approche que l'on peut qualifier de semi-décentralisée consiste à avoir un contrôleur central, aussi appelé « coordonnateur » qui envoie des commandes de moyen niveau aux contrôleurs des robots tels que : « Faire suivre par l'outil la position désirée actuelle $x_i(t)$ avec une force à appliquer par le robot de F_{int} » . En pratique la plupart des lois de commande proposées qui se disent décentralisées suivent cette approche. C'est le cas de celle étudiée et implémentée dans ce projet. Elle est présentée par Bombardier Inc. dans (Bombardier, 1999). Une approche similaire est présentée par (Hsu, 1993). Une démonstration sur un ensemble de robots SCARA est présentée mais l'objet est maintenu dès le début de l'expérience. Elle ne permet donc pas de juger de l'autonomie de chacun des bras. Sun et Mills (Sun, 2002) proposent de coordonner deux robots en utilisant une fonction de synchronisation. Arimoto, Liu et Ogasawara, dans (Liu, 1996), proposent deux schémas de commandes décentralisées. Le deuxième schéma utilise une boucle de rétroaction de

la force que le premier schéma n'utilise pas. Dans les deux cas, la stabilité asymptotique est prouvée. Zhu et De-Schutter (Zhu, 1999) illustrent que cette architecture, associée à la commande adaptative, permet la manipulation d'un oeuf par deux robots industriels.

1.2.3 Approche décentralisée maître-esclave

Quand l'intelligence est décentralisée, elle n'est pas nécessairement distribuée uniformément entre les robots. Une distribution non uniforme conduit à une approche maître-esclave. Dans ce cas, un robot impose le mouvement à l'objet alors que les autres doivent suivre le mouvement en tenant compte d'une force interne désirée. L'avantage de cette formulation est une certaine simplicité de mise en oeuvre. Cependant, cette formulation exige au bras esclave d'avoir une impédance très faible afin de suivre précisément la trajectoire définie par le bras maître.

Cette approche a été la première proposée par des chercheurs pour la coopération entre robot. Alford et Belyeu (Alford, 1984) étaient parmi les pionniers. Cependant, leur expérimentation ne permet pas de valider le comportement du système commandé en chaîne fermée car elle ne comportait pas d'objet à manipuler. D'autres chercheurs (Kopf, 1989), (Zheng, 1986), et (Hayati, 1986) ont démontré que cette approche peut être opérationnelle. Une configuration maître-esclave est implémentée et fonctionnelle sur le CART, le système sur lequel cette recherche est effectuée. Elle utilise la procédure FMA (Force/Moment Accommodation) décrite par Aghili, Dupuis, Martin et Piedboeuf dans (Aghili, 2001). Cette approche correspond à un contrôleur par impédance sans raideur désirée. Elle implique d'asservir le bras maître en vitesse uniquement, ne permet pas de réguler la force interne à une valeur différente de zéro, ni de réguler la force externe.

1.3 Commande en force

Au delà de l'architecture de la commande, il faut définir ce que l'on veut commander. Pour un système mono-robot, il s'agit de contrôler la position de l'outil, et dans certains cas la force qu'il applique à l'environnement. Dans le cas de système multi-robot, la commande en force a un rôle primordial. Les différentes approches pour un robot, telles que la commande hybride position/force ou la commande par impédance, sont alors applicables à un ensemble de robots. L'article de Whitney (Whitney, 1987) présentant l'état de l'art en 1987 dans la commande en force pour un robot est une bonne référence. Pour les systèmes multi-robot, l'étude de l'équipe de Bombardier (Bombardier, 1999) est relativement complète en terme de commande en force car elle compare trois approches différentes. Un robot appliquant une force implique un système sous contraintes. Les recherches sur la détermination des espaces contraints pour un ensemble de robot selon le type de prise et le type d'objet maintenu sont aussi présentées.

1.3.1 Décomposition force interne et force externe

La plupart des études sur les espaces d'application des forces pour la prise d'une pièce par plusieurs robots posent comme hypothèse un maintien rigide d'une pièce rigide. Dans ce cas, les forces appliquées par chaque robot sur l'objet peuvent être décomposées en une force interne, résultant en une tension ou une compression de l'objet, et en une force externe, résultant en un mouvement dans l'espace non contraint et en une force de l'objet sur l'environnement dans l'espace contraint. Les contraintes holonomiques et non holonomiques doivent être satisfaites à chaque instant. La décomposition se base sur la matrice jacobienne de l'objet définie au chapitre 2, et suppose donc une connaissance de la géométrie de la pièce.

Les développements théoriques de Bonitz (Bonitz, 1994) permettent de décomposer ces forces pour une pièce rigide selon trois types de prise par le robot : le maintien rigide, le maintien par une main, et celui par un point de friction. Dans les deux premiers cas, deux prises sont nécessaires pour maintenir un objet. Dans le troisième cas, trois prises sont nécessaires. La différence entre les trois cas vient du nombre d'équations de contraintes associées à chaque point de prise, c'est à dire le niveau de maintien que chaque robot peut avoir sur l'objet. Ce nombre d'axes contraints affecte la dimension de la jacobienne de l'objet.

Han, Trinkle, et Li (Han, 2003) étudie plus en détail la manipulation d'un objet dans le cas de prise par un point de friction. Ils utilisent les LMI (Inégalités Matricielles Linéaires) afin de déterminer les forces de contact minimales nécessaires au maintient de la pièce. Il en résulte une force interne minimale qui rend ce type de prise moins intéressant du point de vue de la commande. De plus, la résolution des LMI est itérative. Cette approche peut difficilement être utilisée pour une implémentation en temps réel.

L'article de Williams (Williams, 1993) propose de donner un sens physique concret au calcul de la force interne en introduisant le concept de « lien virtuel ». La détermination de l'espace nul de la jacobienne pour trouver l'espace d'application des forces internes étant abstrait, il propose d'établir un lien virtuel entre chacun des points de prise et de calculer les forces le long de ces axes. Cette caractérisation a un intérêt surtout dans le cas des systèmes à plus de deux robots. La même équipe du laboratoire dirigé par Oussama Khatib propose aussi dans (Khatib, 1996) un ensemble de relations cinématiques pour des tâches en contact sur des environne-

ments prédéfinis, rigides et sans friction.

1.3.2 Approche hybride position/force

Raibert et Craig (Raibert, 1981) furent parmi les pionniers de la commande hybride position/force. Pour cette approche, les degrés de liberté supplémentaires sont utilisés pour contrôler la force appliquée à l'environnement, sous l'hypothèse d'un contact rigide. Comme l'espace d'application des forces et l'espace disponible pour le mouvement sont orthogonaux, il est possible de contrôler indépendamment la position dans l'espace non contraint, et la force dans l'espace contraint. Le choix du mode de commande se fait par un vecteur de variables de sélection $[s]$, dont les éléments sont posés à 0 ou 1 selon que les mouvements sur les axes sont contraints ou non. Théoriquement, les deux boucles de contrôle sont découplées et le couple à appliquer au robot correspond à l'addition des couples venant des deux boucles de rétroaction. Cette approche est aussi utilisée par (Hsu, 1993), (Liu, 1996), et (Dauchez, 1990). Khatib (Khatib, 1993) propose une formulation pour la commande selon la dynamique de l'outil seulement, dans l'espace cartésien, en tenant compte des espaces contraints et non contraints. Son analyse est étendue aux manipulateurs redondants.

L'inconvénient de cette approche hybride position/force est qu'elle n'est pas adaptée lorsque le contact entre l'outil et l'environnement n'est pas permanent ou que l'environnement n'est pas connu précisément. Lorsque l'outil d'un robot approche l'environnement, et entre en contact avec celui ci, les variables de sélection associées à l'axe du contact doivent changer de valeur au moment précis du contact avec l'environnement. Or la connaissance toujours imparfaite de la géométrie résulte souvent

en une instabilité du système commandé. Ce type de commande ne tient pas compte de l'impédance du robot. Pour cette raison, la plupart des expérimentations proposent des scénarios où le contact est établi en permanence. Peu traitent le passage entre l'espace contraint et l'espace non contraint. Cette phase de transition a été analysée par Mills et Lokhorst (Mills, 1993). Ils démontrent la stabilité asymptotique d'une loi de commande hybride position/force. Leur commande consiste à passer de manière continue de l'état de commande en position à la commande en force et vice versa en superposant les deux modes de commande pendant la transition. Cependant, cela suppose une connaissance parfaite de l'environnement et du robot. L'expérimentation démontre l'efficacité de l'approche.

1.3.3 Approche par impédance

Les travaux de Hogan et de Mason ont posé les concepts importants de la commande par impédance. Pour cette approche, la force mesurée est utilisée pour changer la trajectoire désirée selon une relation d'impédance. Mason (Mason, 1981) formalise la définition des espaces contraints et non contraints. Il définit les surfaces de contrôle selon la tâche à effectuer en utilisant le concept des « C-Surfaces ». Ces dernières sont les surfaces pour lesquelles l'espace est contraint selon certains axes et non contraint selon d'autres.

Hogan (Hogan, 1985) introduit les notions d'impédance du robot et d'admittance de l'environnement. Il insiste sur le fait que cette commande ne vise pas à faire converger le système vers une position ou une force désirée lors d'un contact, mais vise plutôt à assigner une impédance désirée au robot. Cette impédance désirée assure alors un comportement sain lors du passage de l'espace non contraint à contraint et permet de traiter le cas d'un environnement inconnu. Il vérifie expérimentalement

cette théorie dans (Hogan, 1987), en fixant une trajectoire désirée au robot correspondant à un cercle, et en introduisant un obstacle coupant un arc de cercle. Dans plusieurs références, dont (Whitney, 1987) et (DeSantis, 2002), le contrôleur par impédance correspond seulement à la boucle de retour de la force. Il doit se superposer à un contrôleur en position (de type PID, couple pré-calculé, mode de glissement, adaptatif...). Cependant, la commande par impédance proposée par Hogan dans (Hogan, 1987) permet aussi la commande en position. La nuance entre ces deux approches sera discutée plus loin dans la section 3.8.2.

Anderson et Spong (Anderson, 1988) introduisent la commande hybride par impédance. Cette commande utilise des concepts de la commande hybride position/force, à savoir les variables de sélection, et l'applique à la commande par impédance. Une fois le contact établi avec l'environnement, les variables de sélection permettent de faire converger la force vers la force désirée comme un contrôleur hybride position/force. Une approche similaire est implémentée et validée sur un puma 560 par Jung, Hsia et Bonitz (Jung, 1997).

Dans le cas de systèmes multi-robot, la commande par impédance peut être utilisée pour la gestion de la force interne. Étant donnée que le contrôleur par impédance a été formulé de deux façons différentes dans la littérature, les deux approches se retrouvent aussi pour la gestion de la force interne pour les systèmes multi-robot. Ainsi la commande de Hsia et Bonitz (Bonitz, 1996) utilise l'approche de Hogan (Hogan, 1987). De plus, les forces mesurées sont directement linéarisées dans le couple pré-calculé, ce qui rend la commande indépendante de la dynamique de l'objet. Cependant la gestion de la force externe n'est pas considérée. La stabilité simple du système est prouvée mais pas la stabilité asymptotique. Le schéma de contrôle de l'équipe de Bombardier Inc (Bombardier, 1999) utilise l'autre approche

(Whitney, 1987), c'est à dire que les contrôleurs par impédance des bras manipulateurs se superposent à une commande en position. De plus, les études de l'équipe de Bombardier incluent un autre contrôleur par impédance pour la gestion de la force externe. Zhu et De-Schutter (Zhu, 1999) utilisent une approche similaire au HIC (Hybride Impedance Control) pour la manipulation d'un oeuf par deux robots industriels.

Schneider et Cannon introduisent le concept d'impédance de l'objet (Schneider, 1992). L'impédance n'est pas assignée au bout de l'outil mais au niveau de l'objet. Ainsi, on peut considérer que l'objet est tenu par des ensembles de ressorts-amortisseurs avec les outils. L'objet peut être manipulé en tirant l'embout libre du ressort amorti. Cette formulation nécessite une connaissance parfaite de la géométrie et de l'inertie de l'objet.

1.4 Stratégies de commande mono-robot transposées au cas multi-robot

Cette section détaille les architectures de commande appliquées à un robot qui sont utilisées pour les systèmes multi-robot, à savoir le couple pré-calculé, la commande adaptative, la commande par mode de glissement... Cette section mentionne à nouveau plusieurs références présentées auparavant.

La plupart des références utilisent un contrôleur de type couple pré-calculé pour la commande en position de chaque robot. La loi de commande adaptative proposée par Jean et Fu (Jean, 1993) permet de gérer les incertitudes paramétriques

sur l'objet sans nécessiter la mesure des forces aux outils. D'autres commandes adaptatives sont axées sur les incertitudes paramètriques des bras manipulateurs pour le cas multi-robot (Chong Soo, 1997), (Sun, 2002), et (Zhu, 1999). Enfin la commande robuste de Jung (Jung, 1997) gère les incertitudes liées au modèle et à l'environnement. L'algorithme est implémenté sur un PUMA 560.

1.5 Domaines connexes

Nous décrivons ici très brièvement les domaines connexes listés en introduction. Certains de ces domaines de recherche sont analysés plus en détail dans le cadre du projet conduit par Bombardier Inc. (Bombardier, 1999).

Tout d'abord, la gestion de la redondance s'applique pour le système réel en étude, le CART. En effet, celui-ci comporte 7 degrés de liberté par manipulateur alors que seulement 6 degrés de liberté sont nécessaires pour permettre d'atteindre toute position et orientation dans l'espace de travail du système. Le système complet comprenant les deux robots et l'objet est aussi un système redondant car il comporte plus de degrés de liberté que nécessaire pour fixer la position et l'orientation de l'objet dans l'espace. La gestion de la redondance consiste à utiliser intelligemment les avantages de la redondance en optimisant un critère donné (l'énergie, le temps, la vitesse...).

La planification intelligente des tâches permet de gérer, par exemple, le cas de contact inattendu entre l'un des robots et l'environnement. Elle peut aussi servir à l'évitement de la collision.

Un des avantages à utiliser plusieurs robots manipulateurs est de pouvoir transporter des charges qu'un bras seul ne peut porter. Dans ce cadre, la gestion de la distribution de la charge détaillée notamment par Hsu (Hsu, 1993) permet de s'assurer de rester dans la limite de charges permises par les robots selon leur configuration.

Nous avons jusqu'à présent considéré un objet constitué d'un corps solide. Cependant la prise d'objets comportant des degrés de liberté (tel que des ciseaux, un piston...) nécessite un schéma de commande particulier, discuté dans (Hsu, 1993).

La manipulation par un ensemble de robots confère une meilleure dextérité au robot. Cette dextérité peut encore être améliorée en utilisant des mains agiles en bout de bras robotisés. La main « Sarah » de l'Agence Spatiale Canadienne est un bon exemple.

Enfin, les études portant sur la manipulation d'objet non rigide dans un environnement non rigide étendront le type de tâches exécutables par un robot, tel qu'enlever un velcro sur une surface « molle », ou bien manipuler des matières faîtes de caoutchouc.

1.6 Conclusion

Ayant considéré les différentes approches s'offrant à nous, le temps imparti pour le projet, et les résultats de l'étude de Bombardier Inc. (Bombardier, 1999), nous avons choisi de nous concentrer sur une approche décentralisée permettant de bénéficier de l'architecture de commande actuellement en place pour chaque bras

du CART. Il a été décidé de gérer la force interne à l'aide de contrôleurs par impédance, et la force externe par un contrôleur hybride par impédance. La structure de la commande choisie au niveau des bras est le couple pré-calculé car les modèles cinématique et dynamique des bras sont connus relativement précisément.

CHAPITRE 2

MODÈLE DYNAMIQUE

2.1 Introduction

Tous les éléments nécessaires à la modélisation de notre système sont présentés dans ce chapitre. Par système, nous entendons les deux bras ainsi que l'objet. Le système peut être en chaîne fermée ou en chaîne ouverte selon que l'objet est maintenu entre les deux bras ou non. Par système commandé, nous entendons les deux bras, l'objet ainsi que la loi de commande. Ce chapitre contient le modèle dynamique du système à commander, c'est à dire les équations régissant le mouvement des deux bras et de l'objet en fonction des efforts appliqués aux joints des robots et à l'objet. Il détaille la conversion des paramètres cinématiques et des forces des points de prise vers le centre de masse de masse de l'objet, et vice versa, à l'aide de la matrice jacobienne de l'objet. Il indique comment isoler la force interne à l'objet et la force de contact avec l'environnement. Ces différents éléments seront ensuite utilisés pour synthétiser la commande au chapitre 3.

2.2 Modèle dynamique du système

2.2.1 Modèle dynamique du système en chaîne ouverte

Les étapes menant au modèle en chaîne ouverte, tel que montré dans la figure 2.1, sont détaillées ici.

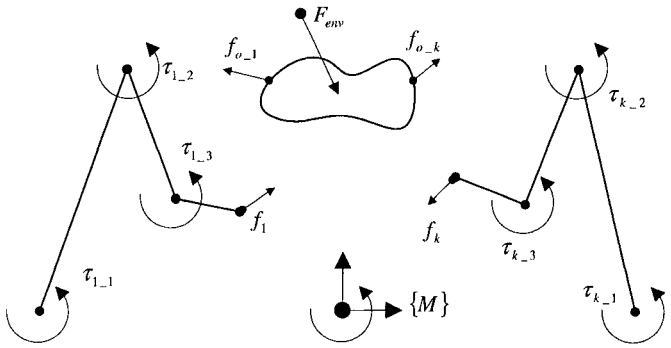


FIG. 2.1 Système en chaîne ouverte

L'équation dynamique pour chaque bras manipulateur soumis à des couples au niveau des joints et à une force à l'outil est :

$$\tau_i = M_i(q_i)\ddot{q}_i + h_i(q_i, \dot{q}_i) + J_i^T(q_i)f_i$$

avec

τ_i = Vecteur de couple des joints du i^e robot

M_i = Matrice d'inertie du i^e robot

h_i = Vecteur contenant la friction, la gravité, l'accélération centripète, et de Coriolis du i^e robot

J_i = Jacobienne du i^e robot

q_i = Vecteur de position des joints du i^e robot

f_i = Forces et moments exercés par l'outil du i^e robot sur l'environnement, dans l'espace « Monde »

Par regroupement des matrices et des vecteurs de k robots, on obtient l'équation

dynamique pour le système des k robots. Notons que la dynamique de chaque robot est indépendante de l'autre robot.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + J^T(q)f$$

avec

$$\begin{aligned} \tau &= [\tau_1 \dots \tau_k]^T \\ M &= diag(M_i) \text{ symétrique définie positive} \\ h &= [h_1 \dots h_k]^T \\ J &= diag(J_i) \\ q &= [q_1 \dots q_k]^T \\ f &= [f_1 \dots f_k]^T \end{aligned}$$

Dans le cas de l'objet, l'équation régissant son mouvement lorsqu'il est soumis à une force appliquée au centre de masse et à des forces appliquées aux k points de prise est l'équation de Newton-Euler :

$$F_{env} = M_o\ddot{x}_o + h_o(x_o, \dot{x}_o) + J_o^T f_o \tag{2.1}$$

où

M_o = Masse de l'objet, matrice symétrique définie positive

h_o = Vecteur non linéaire lié à l'objet

J_{oi} = Matrice Jacobienne de l'objet pour le i^e point de prise

J_o = $[J_{o1} \dots J_{ok}]^T$ Matrice Jacobienne de l'objet

x_o = Position linéaire et angulaire de l'objet dans le référentiel « Monde »

g = Constante de gravitation universelle

F_{env} = Forces et moments exercés par l'environnement sur l'objet et appliqués au centre de masse de l'objet

f_{oi} = Forces et moments exercés par l'objet sur l'environnement et appliqués au i^e point de prise

f_o = $[f_{o1} \dots f_{ok}]^T$

La jacobienne de l'objet J_o permet de déterminer la vitesse en un point d'un corps rigide en fonction à celle d'un autre point du même corps. Plus de détails sur cet outil mathématique sont donnés dans la section 2.2.4.

En regroupant encore les équations des k robots et de l'objet. Nous obtenons le modèle dynamique du système complet en chaîne ouverte donné à l'équation 2.2 et la figure 2.1. Notons que les équations des robots et de l'objet sont toutes entièrement découplées.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{x}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h - J^T f \\ F_{env} - h_o - J_o^T f_o \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

2.2.2 Modèle dynamique du système en chaîne fermée

Quand un objet est manipulé par les k bras manipulateur, le système est dit en chaîne fermée, comme le montre la figure 2.2. Le système d'équation en chaîne ouverte (2.2) est toujours valide. Cependant, il faut ajouter des équations de contraintes afin de prendre en compte la dépendance entre l'accélération de l'objet et celle des outils. Il faut aussi considérer que les forces subies par l'objet aux points de prise correspondent aux forces appliquées par les robots donc $f = -f_o$.

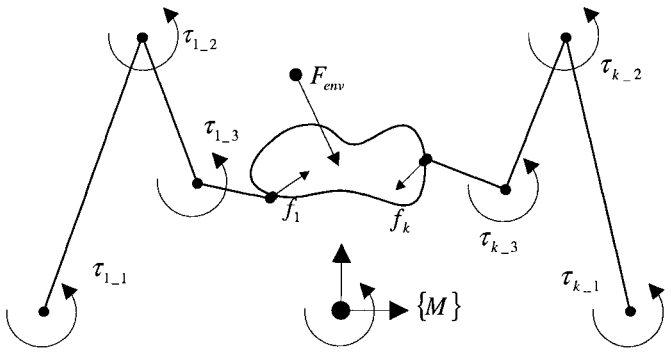


FIG. 2.2 Système en chaîne fermée

Les équations de contraintes sont les suivantes :

$$J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q} = J_o\ddot{x}_o + \dot{J}_o\dot{x}_o$$

L'intégration de l'équation précédente dans le système d'équations 2.2 permet d'obtenir le système en chaîne fermée (2.3), aussi appelé système augmenté. Les forces d'interactions entre l'objet et l'outil, f, interviennent comme des variables dans le

système d'équation, elles sont appelées « Multiplicateurs de Lagrange ».

$$\begin{bmatrix} M & 0 & J^T \\ 0 & M_o & -J_o^T \\ J & -J_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{x}_o \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h \\ F_{env} - h_o \\ \dot{J}\dot{x}_o - \dot{J}\dot{q} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

2.2.3 Discussion sur le nombre de degrés de liberté selon la configuration du système

Le contact entre les robots et l'objet dans le cas de la chaîne fermée fait intervenir des équations de contraintes qui diminuent le nombre de degrés de liberté du système. Le tableau 2.1 met en évidence cette constatation en se basant sur trois systèmes. Le premier correspond au CART, le système présent à l'ASC, consistant en deux robots à 7 degrés de liberté évoluant en 3 dimensions. Le deuxième correspond au système simulé au chapitre 4, c'est à dire 2 robots à 3 degrés de liberté évoluant en 2 dimensions. Le troisième est une généralisation, consistant en k robots à 6 degrés de liberté évoluant en 3 dimensions.

TAB. 2.1 Nombre de variables du système par rapport au nombre de DLL

Paramètres	CART		Simulation		k robots à 6 DLL	
	Ch. Ouv.	Ch. fermée	Ch. Ouv.	Ch. fermée	Ch. Ouv.	Ch. fermée
Nb. variable robots	7×2	7×2	3×2	3×2	$6k$	$6k$
Nb. variable objet	6	6	3	3	6	6
Nb. variable contrainte	0	12	0	6	0	$6k$
Nb. variable total	20	32	9	15	$6(k+1)$	$6(2k+1)$
Nb. DLL robots	7×2	7×2	3×2	3×2	$6k$	$6k$
Nb. DLL objet	6	6	3	3	6	6
Nb. DLL bloqué	0	12	0	6	0	$6k$
Nb. DLL total	20	8	9	3	$6(k+1)$	6

Le tableau 2.1 met en évidence que le nombre de variables correspond au nombre de degrés de liberté dans le cas de la chaîne ouverte. Cependant, dans le cas de la chaîne fermée, le nombre de variables augmente et le nombre de degrés de liberté diminue. Dans le cas du système simulé, le nombre de variables est de 15 alors que le système en chaîne fermée ne possède plus que 3 degrés de liberté. La résolution du système d'équations devient alors plus lourde en chaîne fermée alors que les possibilités de mouvement sont moindres.

Une autre observation faite du tableau est liée au nombre total de degrés de liberté égal à 6 quelque soit le nombre de robots à 6 degrés de liberté fixés rigidement à l'objet. En effet, imposer la position de 6 joints d'un des robots détermine de façon unique la position et l'orientation de l'objet, détermine donc la position et l'orientation des outils de chacun des autres robots, et détermine donc la position des joints de chacun des autres robots de façon unique.

Il faut aussi considérer le fait que les systèmes présentés n'établissent pas de contact avec l'environnement. Dans le cas du système de k robots à 6 DLL, établir un contact avec l'objet qui bloquerait entièrement son mouvement aboutirait alors à un nouveau système comprenant 6 équations de contrainte de plus, et qui n'aurait alors plus aucun degrés de liberté. Les actionneurs ne peuvent alors plus commander la position de l'objet mais peuvent alors être utilisés pour commander la force de contact.

Notons que l'on peut obtenir le nombre d'états facilement à partir des données du tableau. En effet, les états correspondent aux positions et vitesses de chacun des degrés de liberté.

Pour certaines topologies de mécanismes, il est possible de reformuler le système d'équations pour que le nombre de variables du système corresponde exactement

au nombre de degrés de liberté, c'est à dire réécrire le système pour qu'il tienne compte intrinsèquement des équations de contraintes. La résolution du système d'équation s'en trouverait accélérée. Cependant, ce genre d'optimisation n'est pas ou très peu utilisé pour la modélisation de systèmes robotiques sous contrainte dans la littérature classique, et n'a pas été abordé dans ce projet.

2.2.4 Définition de la jacobienne de l'objet J_o

Telle qu'illustrée à la figure 2.3 et expliquée auparavant, la jacobienne de l'objet J_o permet de déterminer la vitesse en un point d'un corps rigide en fonction de celle d'un autre point du même corps. La définition mathématique est la suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = J_o \dot{x}_o$$

où

$\dot{x}_i$ = Vitesse linéaire et angulaire du i^e point de prise dans le référentiel « Monde »

La jacobienne objet est calculée comme suit :

$$J_o = \begin{bmatrix} J_{o1} \\ \vdots \\ J_{ok} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & P_1 \\ 0_3 & I_3 \\ \vdots & \vdots \\ I_3 & P_k \\ 0_3 & I_3 \end{bmatrix} \text{ avec } P_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{bmatrix}$$

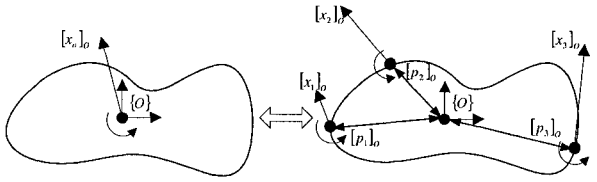


FIG. 2.3 Jacobienne de l'objet pour la détermination des vitesses

où

p_i = $[p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}]'$ Coordonnées du i^e point
de prise dans le référentiel de l'objet

Notons que selon cette définition de la jacobienne objet, $\dot{x}_i$ et x_o doivent être exprimés dans le référentiel de l'objet. Aussi, poser les coordonnées p_i constantes suppose donc de considérer un objet rigide. Cette limitation permet de simplifier la dérivation dans le temps de J_o car $\dot{J}_o = 0$. Considérer $p_i(t)$ pourrait permettre de considérer des objets non rigides, cependant, cela supposerait de connaître l'expression mathématique de l'évolution des déformations du corps dans le temps ou de les mesurer, ce qui n'est pas aisé.

La jacobienne de l'objet permet aussi de transférer les forces et moments des points de prise vers le centre de masse de l'objet.

$$F_{net} = J_o^T f$$

$$= \begin{bmatrix} J_{o1}^T & \dots & J_{ok}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix}$$
$$= J_{o1}^T f_1 + \dots + J_{ok}^T f_k$$

où

F_{net} = Forces et moments exercés par les robots sur l'objet

L'équation précédente et la figure 2.4 mettent en évidence que la jacobienne de l'objet transposée J_o^T permet d'obtenir les forces équivalentes au centre de masse de l'objet selon les forces appliquées aux points de prise, et de les additionner.

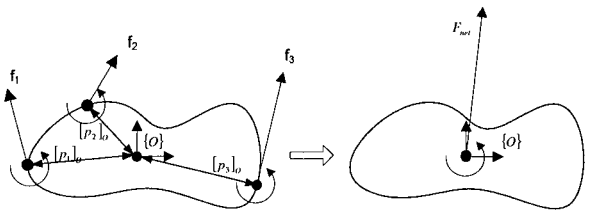


FIG. 2.4 Jacobienne de l'objet pour la détermination des forces

2.3 Modèle statique des forces appliquées à l'objet

2.3.1 Calcul de la force de contact avec l'environnement

Nous supposons que la force F_{env} ne peut être déduite qu'à partir des mesures des forces au niveau des outils des robots f. Nous obtenons tout d'abord la force net en appliquant l'équation précédente :

$$F_{net} = J_o^T f$$

Ensuite, nous pouvons déterminer la force exercée par l'environnement au centre de masse de l'objet (F_{env}). Les mesures f_k prennent en compte la dynamique de l'objet. Afin de déduire F_{env}, il est nécessaire d'annuler cette dynamique. La somme des forces appliquées à l'objet permet d'isoler F_{env}, en supposant donc que la dynamique de l'objet est connue. Les figures (2.5) et (2.6) mettent en évidence les forces en présence dans un cas général et dans un cas en équilibre respectivement.

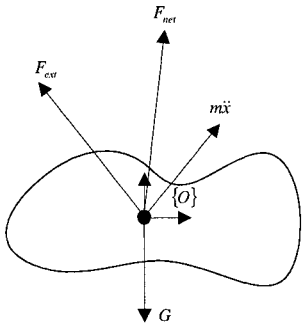


FIG. 2.5 Bilan des forces appliquées à l'objet

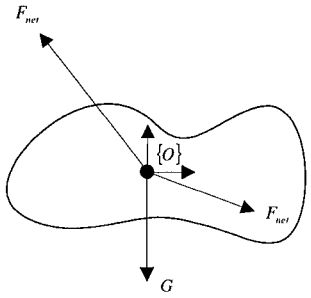


FIG. 2.6 Bilan des forces appliquées à l'objet à l'équilibre

D'après le bilan des forces donné à l'équation 2.1 :

$$F_{env} = M_o\ddot{x}_o - M_o g - F_{net}$$

Cependant, si un capteur de force est placé sur l'objet au niveau du point de contact, alors la force externe F_{env} peut être directement mesurée et convertie en une force équivalente placée au centre de masse de l'objet, à l'aide de l'équation suivante :

$$F_{env} = J_{oi}^T f_{env}$$

Où

f_{env} = Forces et moments exercés par l'environnement sur l'objet et appliqués à l'endroit du capteur de force

J_{oi} = Matrice Jacobienne de l'objet pour le point de mesure i

Il peut paraître inutile d'ajouter un capteur sur l'objet pour mesurer une force qu'il est possible de déterminer avec d'autres mesures. Cependant, avoir un tel capteur sur l'objet permet de ne pas requérir la connaissance de la dynamique de l'objet.

2.3.2 Décomposition des forces aux points de prise

Les forces imposées à l'objet par les outils des robots peuvent être décomposées en une force interne f_{int} et une force induisant un mouvement f_{mouv}, comme présenté sur la figure (2.7).

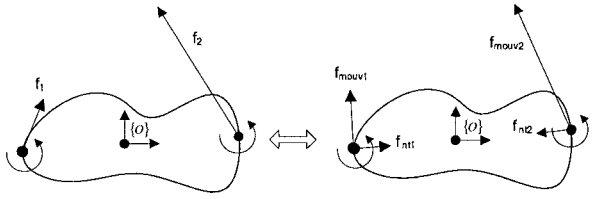


FIG. 2.7 Décomposition des forces appliquées à l'objet

La combinaison des deux composantes des forces appliquées par les robots converties au centre de masse donne la force net :

$$F_{net} = J_o^T f = J_o^T (f_{mouv} + f_{int})$$

Où

f_{mouv} = $[f_{mouv1} \cdots f_{mouvk}]^T$ Forces et moments appliqués aux points de prise induisant un mouvement de l'objet

f_{int} = $[f_{int1} \cdots f_{intk}]^T$ Forces et moments internes à l'objet appliqués aux points de prise

Il faut mentionner que f_{mouv} est appelée force de « mouvement » par abus de langage. En effet, elle peut résulter en un mouvement dans une direction non contrainte mais aussi en une force d'interaction dans une direction contrainte. Les forces internes produisent seulement de la tension ou de la compression. Leur somme au niveau de l'objet est de zéro donc elles ne contribuent pas au mouvement de l'objet. Mathématiquement, elles sont comprises dans l'espace nulle de la jacobienne ($J_o^T f_{int}$=0). Les forces de mouvement sont comprises dans l'espace complémentaire. Il est possible de décomposer la force appliquée par les robots en force interne et en force externe à l'aide des expressions suivantes :

$$f_{mouv} = (J_o^{T\dagger} J_o^T) f$$

$$f_{int} = (I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T) f$$

$J_o^{T\dagger}$ est la pseudo inverse de J_o^T détaillée dans la section (2.3.2.3).

2.3.2.1 Démonstration des expressions f_{mouv} et f_{int}

Comme seule la composante f_{mouv} contribue au mouvement :

$$\begin{aligned} J_o^T f &= J_o^T (f_{mouv} + f_{int}) \\ \Leftrightarrow J_o^T f &= J_o^T f_{mouv} + J_o^T f_{int} \\ \Leftrightarrow J_o^T f &= J_o^T f_{mouv} \\ \Leftrightarrow f_{mouv} &= J_o^{T\dagger} J_o^T f \quad \text{CQFD} \end{aligned}$$

Et pour f_{int} :

$$\begin{aligned} f &= f_{mouv} + f_{int} \\ \Leftrightarrow f_{int} &= f_{mouv} - f \\ \Leftrightarrow f_{int} &= J_o^{T\dagger} J_o^T f - f \\ \Leftrightarrow f_{int} &= \left(I - J_o^{T\dagger} J_o^T\right) f \quad \text{CQFD} \end{aligned}$$

2.3.2.2 Propriété des opérateurs de projection

$(J_o^{T\dagger} J_o^T)$ et $(I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T)$ sont des opérateurs de projection. Ces matrices sont dit idempotentes car $(J_o^{T\dagger} J_o^T)^2 = (J_o^{T\dagger} J_o^T)$ et $(I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T)^2 = (I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T)$. En pratique, cela met en évidence qu'un vecteur projeté une fois par un des opérateurs ne sera pas affecté par d'autres projections par le même opérateur.

2.3.2.3 Calcul de la pseudo-inverse $J_o^{T\dagger}$

La matrice jacobienne J_o^T est de dimension $6 \times 6k$. Son inversion aboutit à un système d'équations sous contraintes. Ajouter un critère d'optimisation permet de déterminer f de façon univoque en connaissant F_{net}.

Minimiser le critère quadratique :

$$I = \frac{1}{2} f^T A f \text{ avec } A \text{ matrice carrée } 6k \times 6k$$

Sous la contrainte :

$$F_{net} - J_o^T f = 0_{6k\times 1}$$

Permet de trouver la pseudo-inverse :

$$J_o^{T\dagger} = AJ_o^T(J_oAJ_o^T)^{-1}$$

Pour que la composante de la force induisant le mouvement ne contribue pas à la force interne, la matrice de pondération doit être choisie de telle façon que :

$$J_o^{T\dagger} = \frac{1}{k}\begin{bmatrix} J_{o1}^{-T} \\ \vdots \\ J_{ok}^{-T} \end{bmatrix}$$

Pour ce faire, la matrice de pondération doit être sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} \Delta & \dots & 0_6 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_6 & \dots & \Delta \end{bmatrix} \text{ avec } \Delta = \begin{bmatrix} 0_3 & I_3 \\ I_3 & 0_3 \end{bmatrix}$$

2.3.3 Cas de deux robots

Les opérateurs de projection dans le cas de deux robots peuvent être simplifiés de la façon suivante :

$$F_{int1,2} = \frac{1}{2}\left(\pm J_{o1}^T f_1 \mp J_{o2}^T f_2\right)$$

$$F_{mouv} = J_{o1}^T f_1 + J_{o2}^T f_2$$

2.3.3.1 Démonstration de l'expression F_{int}

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} f_{int1} \\ f_{int2} \end{bmatrix} &= \left(I - J_o^{T\dagger} J_o^T\right) f \\
&= \left(I - \frac{1}{2}\begin{bmatrix} J_{o1}^{-T} \\ J_{o2}^{-T} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} J_{o1}^T & J_{o2}^T \end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\
&= \left(I - \frac{1}{2}\begin{bmatrix} J_{o1}^T J_{o1}^{-T} & J_{o2}^T J_{o1}^{-T} \\ J_{o1}^T J_{o2}^{-T} & J_{o2}^T J_{o2}^{-T} \end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2}\begin{bmatrix} f_1 - J_{o1}^{-T} J_{o2}^T f_2 \\ -J_{o2}^T J_{o1}^T f_1 + f_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

D'où

$$\begin{aligned}
F_{int1} &= J_{o1}^T f_{int1} \\
&= \frac{1}{2}\left(J_{o1}^T f_1 - J_{o2}^T f_2\right) \quad \text{CQFD}
\end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned}
F_{int2} &= J_{o2}^T f_{int2} \\
&= \frac{1}{2}\left(-J_{o1}^T f_1 + J_{o2}^T f_2\right) \quad \text{CQFD}
\end{aligned}$$

Nous confirmons aussi que $F_{int1} = -F_{int2}$ en tout temps.

2.3.3.2 Démonstration de l'expression F_{mouv}

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} f_{mouv1} \\ f_{mouv2} \end{bmatrix} &= \left(J_o^{T\dagger} J_o^T\right) f \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_{o1}^{-T} \\ J_{o2}^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{o1}^T & J_{o2}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_{o1}^T J_{o1}^{-T} & J_{o2}^T J_{o1}^{-T} \\ J_{o1}^T J_{o2}^{-T} & J_{o2}^T J_{o2}^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} f_1 + J_{o1}^{-T} J_{o2}^T f_2 \\ J_{o2}^T J_{o1}^T f_1 + f_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

D'où

$$\begin{aligned}
F_{mouv} &= J_o^T f_{mouv} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_{o1}^T & J_{o2}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{mouv1} \\ f_{mouv2} \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \left(J_{o1}^T f_1 + J_{o2}^T f_2\right) + \frac{1}{2} \left(J_{o1}^T f_1 + J_{o2}^T f_2\right) \\
&= J_{o1}^T f_1 + J_{o2}^T f_2 \quad \text{CQFD}
\end{aligned}$$

2.4 Transfert de paramètres cinématiques en différents points de l'objet

Lors de la définition de la jacobienne de l'objet de la section 2.2.4, les transferts de paramètres cinématiques, tel qu'illustrés à la figure 2.8, étaient abordés au niveau des vitesses seulement. Les outils sont complétés ici pour obtenir les positions, orientations, et les accélérations des points de prise en fonction de celles du centre de masse de l'objet.

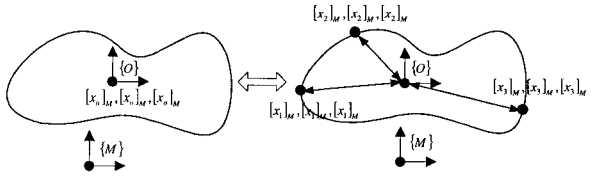


FIG. 2.8 Transfert de la cinématique du centre de masse de l'objet vers les points de prise

En position et en orientation pour le i^e point de prise :

$$\begin{aligned} [x_{i\chi}]_M &= [x_{o\chi}]_M + Rot(M,O)[p_i]_O \\ Rot(M,i) &= Rot(M,O)Rot(O,i) \end{aligned}$$

En vitesse :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = J_o \dot{x}_o$$

En accélération :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} = J_o \ddot{x}_o + \dot{J}_o \dot{x}_o$$

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT DE LA LOI DE COMMANDE

3.1 Introduction

Ce chapitre utilise le modèle dynamique et les outils développés dans le chapitre 2 afin de synthétiser une commande adaptée. La commande est basée sur le contrôle par impédance pour la gestion de la force interne et externe à l'objet, et sur le couple pré-calculé pour le contrôle en position. Le contrôle par impédance crée un lien entre la force et la vitesse. Il modifie la trajectoire désirée selon les forces mesurées. Par la suite, les équations de distribution permettent de déterminer la cinématique requise pour les outils des deux robots en fonction de la cinématique désirée pour l'objet. Le contrôle en position et en force de chacun des deux robots est alors effectué de façon indépendante par chacun des deux robots. L'approche est relativement décentralisée car le modérateur distribue des commandes de haut niveau à chacun des deux bras, à savoir leurs positions désirées et leurs forces internes désirées. Elle permet de commander tous les degrés de liberté en chaîne ouverte. Dans le cas de la chaîne fermée, les degrés de liberté bloqués sont utilisés pour commander les forces, soit internes, soit externes. La commande est schématisée à la figure 3.1.

3.2 Calcul des forces et de la cinématique de l'objet

La figure 3.2 permet de mettre en évidence les entrées et sorties de ce module, et de le situer dans la loi de commande générale (figure 3.1).

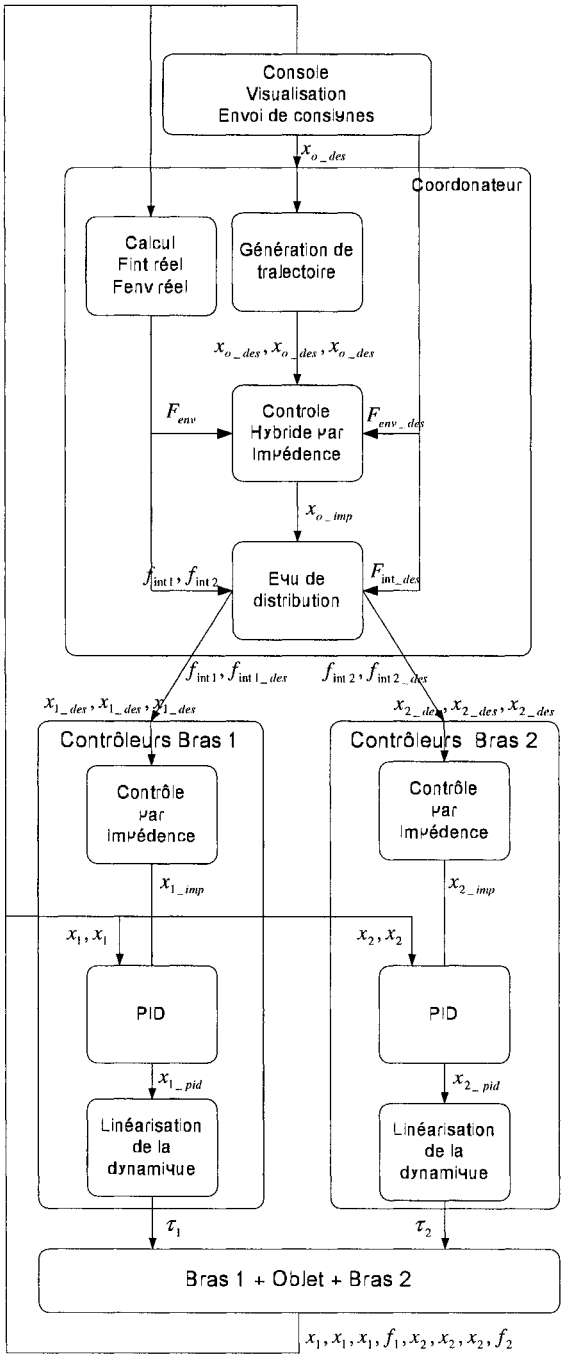


FIG. 3.1 Loi de commande

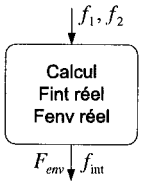


FIG. 3.2 Entrées et sorties du calcul des forces

Les forces de contact appliquées par l'environnement sur l'objet sont calculées en fonctions des efforts mesurés f aux outils des deux robots selon les résultats présentés dans la section 2.3.1 :

$$F_{env} = M_o\ddot{x}_o - M_o g - J_o^T f$$

Les forces internes à l'objet appliquées par chaque bras sont obtenues de la section 2.3.2 :

$$f_{int} = (I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T) f$$

Le calcul des paramètres cinématiques réels de l'objet n'est pas utilisé directement dans la loi de commande. Cependant, il est nécessaire afin de déterminer la jacobienne de l'objet J_o dans le référentiel « Monde », et ainsi de calculer les forces internes et externes réellement appliquées à l'objet. Les paramètres cinématiques peuvent aussi être utilisés dans les machines à états finis pour fin de sécurité. Le calcul est basé sur les équations de distribution détaillées dans la section 2.4.

En position et en orientation :

$$\begin{aligned} [x_{o\chi}]_M &= [x_{i\chi}]_M - Rot(M,O)[p_i]_O \\ Rot(M,O) &= Rot(M,i)Rot(i,O) \end{aligned}$$

En vitesse :

$$\dot{x}_o = J_o^{\dagger} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix}$$

En accélération :

$$\ddot{x}_o = J_o^{\dagger} \left[\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} - \dot{J}_o \dot{x}_o \right]$$

3.3 Commande en force externe

3.3.1 Formulation de la commande par impédance

La figure 3.3 met en évidence les entrées et les sorties du module détaillé. La formulation du contrôleur par impédance lié à la force de contact entre l'objet et l'environnement correspond à une équation différentielle linéaire du deuxième ordre :

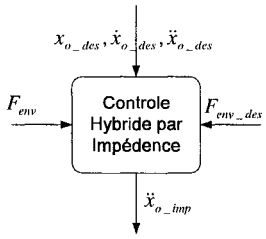


FIG. 3.3 Entrées et sorties de la gestion des forces externes

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{o_imp} &= \ddot{x}_{o_des} + M_{des}^{-1}[(F_{env_des} - F_{env}) + \\ &\quad + B_{des}(\dot{x}_{o_des} - \dot{x}_{o_imp}) + \\ &\quad + K_{des}\begin{pmatrix} x_{o_des} - x_{o_imp} \\ e_{Rot} \end{pmatrix}]\end{aligned}$$

où

$$\begin{aligned} e_{Rot} &= \Delta(R_{o_des}R^T) \\ R_{o_des} &= \text{Matrice de rotation } Rot(M,O) \text{ désirée} \\ R_o &= \text{Matrice de rotation } Rot(M,O) \text{ réelle} \\ M_{des} &= \text{Matrice de masse désirée pour l'objet} \\ B_{des} &= \text{Matrice d'amortissement désirée pour l'objet} \\ K_{des} &= \text{Matrice de souplesse désirée pour l'objet} \\ F_{env_des} &= \text{Force et moment désirés a exercés par l'environnement sur l'objet} \end{aligned}$$

Notons que l'implémentation du contrôleur par impédance nécessite d'obtenir la matrice de rotation (dimension 3×3) à partir de l'intégration de la vitesse angulaire (dimension 3×1). L'opération nécessaire est :

$$\dot{R}_o = S\left(\Omega_O\right) R_o \quad \text{avec } S\left(\Omega_O\right) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{Oz} & \Omega_{Oy} \\ \Omega_{Oz} & 0 & -\Omega_{Ox} \\ -\Omega_{Oy} & \Omega_{Ox} & 0 \end{bmatrix}$$

Afin de comprendre le comportement de la commande, l'équation différentielle linéaire de deuxième ordre donnée plus haut doit être écrite sous la forme de fonction de transfert dans le domaine de Laplace. Pour cela, les six axes de l'espace cartésien sont découplés ainsi :

$$\frac{\Delta x_{o_j}}{\Delta F_{env_j}} = \frac{1}{M_{des_j} s^2 + B_{des_j} s + K_{des_j}} \text{ avec } j = 1...6$$

où

$$\begin{aligned} M_{des_j} &= \text{Masse désirée pour l'objet selon le } j^e \text{ axe} \\ B_{des_j} &= \text{Amortissement désirée pour l'objet selon le } j^e \text{ axe} \\ K_{des_j} &= \text{Souplesse désirée pour l'objet selon le } j^e \text{ axe} \\ \Delta F_{env_j}(s) &= F_{env_des_j}(s) - F_{env_j}(s) \text{ Erreur en force selon l'axe } j \\ \Delta x_{o_j}(s) &= x_{o_des_j}(s) - x_{o_imp_j}(s) \text{ Correction en position selon l'axe } j \end{aligned}$$

Tout d'abord, nous constatons que si la force réelle correspond à la force désirée ($\Delta F_{env_j}(s) = 0$) alors la trajectoire convergera vers la force désirée ($\Delta x_{o_j}(s) = 0$ d'où $\lim_{t\to\infty} \Delta x_{o_j}(t) = 0$).

Il est possible que la commande n'arrive ni à satisfaire la position désirée et la force désirée en même temps. Pour cette raison, Hogan (Hogan, 1987) insiste sur le fait qu'on veut une impédance désirée et non une position ou une force. Par exemple, si la force désirée est non nulle et l'objet est dans un espace non contraint,

alors la trajectoire imposée s'éloigne constamment de la trajectoire désirée sans pouvoir induire une force quelconque. Si l'objet est dans un espace contraint alors la trajectoire imposée converge vers une position d'équilibre dépendamment des pondérations M_{des}, B_{des}, et K_{des}. Ces constatations sont expliquées mathématiquement dans la prochaine section.

3.3.1.1 Détail mathématique de l'effet combiné d'une position et une force désirée

Nous introduisons ici une écriture simplifiée pour faciliter la lecture et pour mettre en évidence que le résultat est applicable pour tout contrôleur par impédance. La fonction de transfert donnée plus haut est réécrite de la façon suivante :

$$\frac{\Delta x}{\Delta F} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

où

$$\begin{aligned} m &= \text{Masse désirée selon un axe donné} \\ b &= \text{Amortissement désirée selon un axe donné} \\ k &= \text{Souplesse désirée selon un axe donné} \\ \Delta F(s) &= F_{des}(s) - F(s) \text{ Erreur en force} \\ \Delta x(s) &= x_{des}(s) - x_{imp}(s) \text{ Correction en position} \end{aligned}$$

L'analyse, limitée à une dimension, peut s'étendre en trois dimensions car les axes sont découplés dans la formulation du contrôleur par impédance. Nous nous plaçons dans le cas d'un contact permanent avec l'environnement, tel qu'illustré sur le schéma 3.4. Considérons un environnement dont la relation entre la déformation et la force est de type ressort ($F = K_r x_{imp}$). Le fait que la force de contact soit

considérée au centre de masse de l'objet plutôt que sur le contour n'a pas d'influence sur l'analyse. Considérons que la commande en position de l'objet est parfaite. Le système présenté à la figure 3.4 a donc deux entrées (la position désirée et la force désirée) et deux sorties interdépendantes (la position et la force).

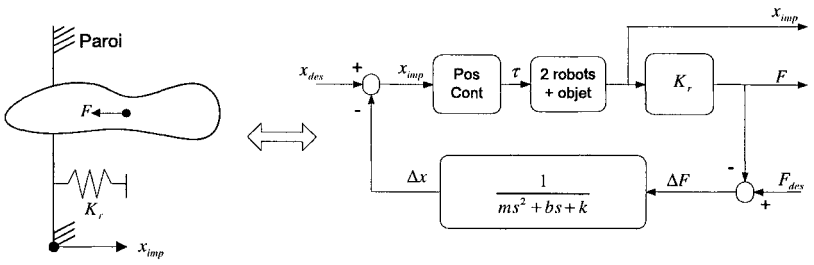


FIG. 3.4 Commande par impédance simplifiée en 1D

Après avoir trouvé les fonctions de transfert équivalentes du système bouclé, nous obtenons l'influence des deux entrées sur la position :

$$\frac{x_{imp}}{x_{des}} = \frac{ms^2+bs+k}{ms^2+bs+k+K_r}$$
$$\frac{x_{imp}}{F_{des}} = \frac{1}{ms^2+bs+k+K_r}$$

Et de même pour l'influence des deux entrées sur la force :

$$\begin{aligned} \frac{F}{x_{des}} &= \frac{K_r(ms^2+bs+k)}{ms^2+bs+k+K_r} \\ \frac{F}{F_{des}} &= \frac{K_r}{ms^2+bs+k+K_r} \end{aligned}$$

Toutes ces équations étant linéaires, nous avons donc par superposition :

$$\begin{aligned} x_{imp} &= \frac{x_{imp}}{F_{des}}F_{des} + \frac{x_{imp}}{x_{des}}x_{des} \\ F &= \frac{F}{F_{des}}F_{des} + \frac{F}{x_{des}}x_{des} \end{aligned}$$

En considérant des entrées en échelon ($F_{des} = \frac{F_{ech}}{s}$ et $x_{des} = \frac{x_{ech}}{s}$) et en appliquant le théorème de la valeur finale, nous obtenons pour la position :

$$\lim_{t\to\infty} x_{imp}(t) = \frac{k}{K_r+k}x_{ech} + \frac{1}{K_r+k}F_{ech} \tag{3.1}$$

Et pour la force :

$$\lim_{t\to\infty} F(t) = \frac{K_r k}{K_r+k}x_{ech} + \frac{K_r}{K_r+k}F_{ech} \tag{3.2}$$

Quelles que soient les valeurs désirées x_{ech} et F_{ech}, nous vérifions que ni la position ni la force réelle ne va converger vers sa valeur désirée. Toujours sous l'hypothèse d'un comportement de l'environnement de type $F = K_r x_{imp}$, l'équilibre qui sera atteint dépendra des valeurs de k et K_r.

3.3.2 Formulation de la commande hybride par impédance

Afin de pallier les problèmes mentionnés plus haut, il est possible d'utiliser les variables de sélection μ_x et μ_f. Cette approche est présentée par Spong (Anderson, 1988) et nommée « commande hybride par impédance ». Ces variables de sélection agissent comme des interrupteurs dans la formulation du contrôleur en leur faisant prendre les valeurs 1 ou 0. Notons que ces variables de sélection n'ont pas le même but que celles utilisées pour la commande hybride position/force pour des raisons expliquées plus loin. La formulation mathématique du contrôleur devient :

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{o_imp} &= \mu_x \ddot{x}_{o_des} + M_{des}^{-1}[(\mu_f F_{env_des} - F_{env}) + \\ &\quad + B_{des}(\mu_x \dot{x}_{o_des} - \dot{x}_{o_imp}) + \\ &\quad + \mu_x K_{des} \begin{pmatrix} x_{o_des} - x_{o_imp} \\ e_{Rot} \end{pmatrix}] \end{aligned}$$

$\mu_x = 0$ a pour effet de poser la vitesse et l'accélération désirée à 0 et d'ignorer la position. $\mu_f = 0$ a pour effet de poser la force désirée à 0. Afin d'éviter les discontinuités dans la commande, il est préférable de faire changer de valeurs de μ_x et de μ_f de manière continue.

Si le robot est dans un espace non contraint, poser $\mu_x = 1$ et $\mu_f = 0$ permet au robot de suivre sa trajectoire désirée même si $F_{env_des} \neq 0$. Ainsi, le robot réagira de façon stable en cas de contact et appliquera une force à l'environnement dépendamment de la position désirée et des matrices de masse, de souplesse, et d'amortissement désirée.

Si le robot est dans un espace contraint, poser $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 1$ permet de faire

converger la force vers sa valeur désirée, et poser $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 0$ permet de faire converger la force vers 0.

L'effet des variables de sélection au niveau des équations est donné ci-après.

3.3.2.1 Détail mathématique de l'effet combiné d'une position et une force désirée avec μ_x et μ_f

Les explications précédentes sont confirmées mathématiquement en introduisant μ_x et de μ_f dans les équations 3.1 et 3.2. Le même passage à la limite avec la notation simplifiée et la consigne en échelon ($F_{des} = \frac{F_{ech}}{s}$ et $x_{des} = \frac{x_{ech}}{s}$) donne alors pour la position :

$$\lim_{t\to\infty} x_{imp}(t) = \frac{\mu_x k}{K_r + \mu_x k} x_{ech} + \frac{1}{K_r + \mu_x k} \mu_f F_{ech}$$

Et pour la force :

$$\lim_{t\to\infty} F(t) = \frac{K_r \mu_x k}{K_r + \mu_x k} x_{des} + \frac{K_r}{K_r + \mu_x k} \mu_f F_{ech}$$

Comme expliqué avant, si $\mu_x = 0$, nous obtenons bien $\lim_{t\to\infty} F(t) = \mu_f F_{des}$ quelle que soit la position désirée x_{des} et la constante de raideur K_r. Si $\mu_x = 1$ alors la position convergera vers la position désirée seulement si $\mu_f = 0$.

Le fait que la force converge vers celle désirée si $\mu_x = 0$ quelque soit K_r indique que l'analyse est aussi vrai pour le cas de contact rigide. Cependant, l'analyse ne prend pas en compte le problème de délai qui intervient lorsqu'il y a une boucle

algébrique. Elle est valide seulement quand les forces sont obtenues en fonction des états du système.

3.3.2.2 Utilisation des variables de sélection par l'opérateur

Typiquement, un comportement stable face à un environnement inconnu, quelque soit le point d'application de la force sur l'objet, est assuré tant que l'opérateur maintient $\mu_x = 1$ et $\mu_f = 0$. Ensuite, une fois qu'un contact voulu est établi de manière stable, alors l'opérateur peut demander au système de faire converger la force vers la force désirée en posant $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 1$. Dans ce cas, il doit spécifier la grandeur, la direction, et le point d'application de la force qu'il veut appliquer. La force désirée doit alors être transposée en une force équivalente appliquée au centre de masse et dans le référentiel approprié pour être traité par la commande hybride pas impédance. L'opérateur peut aussi demander au robot de ne pas appliquer de force à l'environnement quelque soit la position désirée en posant $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 0$. Notons que l'utilisation des variables de sélections ne va pas affecter la stabilité du système mais plutôt sa capacité à réguler la force autour de celle désirée.

L'utilisation de ces variables ne peut pas être assimilée à celle de la commande hybride position/force. En effet, dans ce dernier cas, la commande en force nécessite une connaissance parfaite de la géométrie de l'environnement. L'utilisation des variables de sélection doit se faire au moment précis du contact avec l'environnement. Or la connaissance toujours imparfaite de la géométrie résulte souvent en une instabilité du système commandé. Les valeurs des variables de sélection dans le cas de la commande hybride pas impédance dépendent des choix de l'opérateur et non de l'environnement.

3.4 Distribution des commandes aux deux bras

La figure 3.5 illustre les entrées et sorties du module détaillé ici, telles qu'indiquées dans la loi de commande générale 3.1.

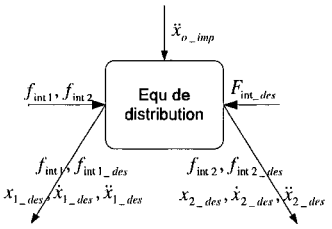


FIG. 3.5 Entrées et sorties de la distribution des commandes

3.4.1 Distribution des paramètres cinématiques vers les points de prise

Afin de connaître les positions désirées aux points de prise en fonction de la position désirée du centre de masse de l'objet, il faut utiliser les équations de distribution détaillées dans la section 2.4.

En position et en orientation pour le i^e point de prise :

$$\begin{aligned} [x_{i\chi}]_M &= [x_{o\chi}]_M + Rot(M,O)[p_i]_O \\ Rot(M,i) &= Rot(M,O)Rot(O,i) \end{aligned}$$

En vitesse :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = J_o \dot{x}_{o_imp}$$

En accélération :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} = J_o \ddot{x}_{o_imp} + \dot{J}_o \dot{x}_{o_imp}$$

3.4.2 Distribution des forces internes aux bras

Afin de connaître les forces internes désirées aux points de prise en fonction de celles désirée au centre de masse de l'objet, il faut utiliser les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} f_{int1_des} \\ f_{int2_des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_o^T \\ -J_o^T \end{bmatrix} [F_{int_des}]$$

Cette formulation permet de s'assurer que les forces désirées sont comprises dans l'espace des forces internes, c'est à dire que $F_{int1} = -F_{int2}$ en tout temps.

3.5 Commande en force interne

Lors du passage en chaîne fermée, les degrés de liberté perdus sont utilisés pour commander la force interne. La formulation illustrée à la figure 3.6 est la même que pour la commande de la force de contact avec l'environnement, F_{env}. Cependant, les variables de sélection μ_x et μ_f ne sont pas inclues car elles ne s'avèrent pas utiles.

En effet, il n'est pas nécessaire de traiter le cas d'espace non contraint car la commande de la force interne implique un contact permanent avec l'objet. Ainsi μ_f n'est pas nécessaire. Aussi, la force interne réelle doit converger vers la force interne désirée sans avoir à poser $\mu_x = 0$. En effet, la distribution des paramètres

cinématiques vers les points de prise a un effet équivalent à poser $\mu_x = 0$ dans le formulation de la commande par impédance, tant que la géométrie de la pièce est connue parfaitement et que l'objet est rigide. Ceci n'est pas démontré rigoureusement ici.

Les deux forces internes doivent évoluer symétriquement pour s'assurer que leurs sommes au centre de masse soient de zéro, comme le présente la figure 3.7, c'est à dire que l'on travaille dans l'espace nul de la jacobienne de l'objet J_o. Notons qu'il est possible avec la formulation proposée de retrouver une configuration maître-esclave.

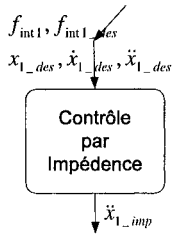


FIG. 3.6 Entrées et sorties de la gestion des forces internes

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i_imp} &= \ddot{x}_{i_des} + M_{des}^{-1}[(f_{inti_des} - f_{inti}) + \\ &\quad + B_{des}(\dot{x}_{i_des} - \dot{x}_{i_imp}) + \\ &\quad + K_{des} \begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_imp} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix}] \end{aligned}$$

où

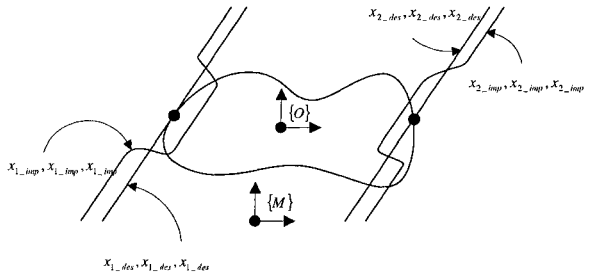


FIG. 3.7 Modification de la trajectoire aux points de prise pour la régulation des forces internes

f_{inti_des} = Forces et moments internes désirés à appliqués au i^e point de prise

f_{inti} = Forces et moments internes réels appliqués au i^e point de prise

3.6 Commande en position dans l'espace cartésien

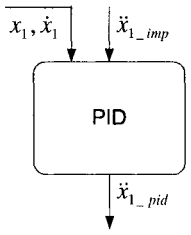


FIG. 3.8 Entrées et sorties de la commande en position

La commande en position, dont les entrées et sorties sont données à la figure 3.8, se

fait à l'aide d'un couple pré-calculé classique. La dynamique du système linéarisé dans l'espace cartésien est comme suit :

$$\ddot{x}^*_{i_pid} = \ddot{x}_{i_pid} + K_{i_D}(\dot{x}_{i_des} - \dot{x}_{i_pid}) + \\ +K_{i_P}\begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_pid} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix} + K_{i_I}\int \begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_pid} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix} dt \qquad (3.3)$$

avec

K_{i_P} = Gain proportionnel du PID pour le i^e robot

K_{i_I} = Gain intégral du PID pour le i^e robot

K_{i_D} = Gain dérivé du PID pour le i^e robot

x_{i_pid} = Position et orientation de l'objet requise par le PID

3.7 Linéarisation de la dynamique

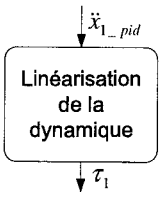


FIG. 3.9 Entrées et sorties de la linéarisation de la dynamique

Le système non linéaire est linéarisé (figure 3.9) par le couple pré-calculé suivant :

$$\tau_i = \tilde{M}_i(q_i)\ddot{q}^*_i + \tilde{h}_i(q_i, \dot{q}_i) + \tilde{J}^T_i f_i$$

où

$\tilde{M}_i$ = Matrice de masse estimée du i^e robot

$\tilde{h}_i$ = Vecteur non linéaire estimée du i^e robot

$\tilde{J}_i$ = Matrice Jacobienne estimée i^e robot

Comme les efforts mesurés font partie de la linéarisation exacte grâce au terme $\tilde{J}_i^T f_i$, l'inertie de l'objet n'est pas vue comme une perturbation. Elle n'affecte pas la dynamique du système commandé. Cependant, il faut considérer que pour une implémentation en temps réel sur le système expérimental, il y a nécessairement un retard entre la force réelle et son annulation. Le choix des gains du PID qui conditionne la dynamique des robots doit dépendre de la période d'échantillonnage pour assurer la stabilité du système commandé, tel que présenté par Hsia et Bonitz dans (Bonitz, 1996). Ce choix sera détaillé dans le chapitre 5.

Comme le contrôle se fait dans l'espace cartésien, la commande intermédiaire ($\ddot{q}_i^*$) doit être déterminée en fonction de $x_\ddot{imp}_i^*$, soit :

$$\ddot{q}*_i = \tilde{J}_i^{-1}(\ddot{x}_{i_imp}^* - \dot{\tilde{J}}_i\dot{q}_i)$$

3.8 Discussion sur la loi de commande

3.8.1 Formulation globale et stabilité

Notons que la loi de commande présentée peut difficilement être écrite en une équation unique en raison des cinq équations différentielles qu'elle comprend, à savoir, deux pour les PID et trois pour les contrôleurs par impédance. Au mieux, nous pouvons isoler la commande en position pour chaque bras :

$$\tau_i = \tilde{M}_i[\tilde{J}_i^{-1}(\ddot{x}_{i_pid} + K_{i_D}(\dot{x}_{i_des} - \dot{x}_{i_pid}) + \\ + K_{i_P}\begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_pid} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix} + K_{i_I}\int \begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_pid} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix} dt - \\ - \dot{\tilde{J}}_i \dot{q}_i)] + \tilde{h}_i + \tilde{J}_i^T f_i$$

En remplaçant la commande dans l'équation du système comprenant un robot, nous retrouvons bien la dynamique voulue de l'équation du PID 3.3.

La stabilité du système commandé n'est pas abordée car la recherche de la fonction de Lyapunov n'est pas évidente. Les travaux de l'équipe de Bombardier n'ont pas non plus permis d'isoler une fonction de Lyapunov.

3.8.2 Approche de Bonitz pour la commande par impédance

L'approche de Bonitz et Hsia (Bonitz, 1996) pour la gestion de la force interne est très similaire à celle de Bombardier, cependant, elle est basée sur la commande par impédance développée par Hogan (Hogan, 1987), comme le montre la figure 3.10. En effet, la commande par impédance reprise par Bonitz et Hsia est utilisée pour contrôler la force interne mais aussi la position.

Mathématiquement, la commande s'écrit :

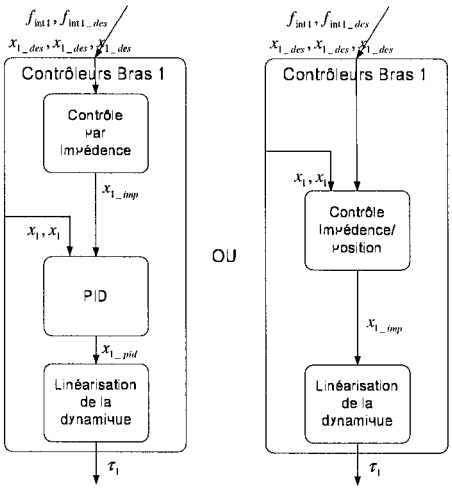


FIG. 3.10 Approche de Bombardier vs Bonitz

$$\tau_i = \tilde{M}_i[\tilde{J}_i^{-1}(\ddot{x}_{i_des} + M_{des}^{-1}[(F_{int_des} - F_{int}) + \\ +B_{des}(\dot{x}_{i_des} - \dot{x}_{i_imp}) + K_{des}\begin{pmatrix} x_{i_des} - x_{i_imp} \\ e_{i_Rot} \end{pmatrix}] - \\ -\dot{\tilde{J}}_i\dot{q}_i)] + \tilde{h}_i + \tilde{J}_i^T f_i$$

Avec cette approche, et en ne tenant pas compte du contact de l'objet avec l'environnement, une fonction de Lyapunov a pu être trouvée. La stabilité simple est prouvée mais pas la stabilité asymptotique. De plus, la démonstration suppose un système parfaitement linéarisé.

La nuance entre les deux approches est discutée plus en détail dans le chapitre 5.

CHAPITRE 4

SIMULATION

4.1 Introduction

Afin de démontrer la validité de la commande présentée dans le chapitre 3, un système de deux robots planaires à 3 degrés de liberté a été modélisé et commandé en simulation. Cette étape intermédiaire vers la commande du système réel, appelée CART et implémenté au chapitre 5, présente trois avantages :

- Comprendre les principes sur un système dont la topologie (avec 9 degrés de liberté en chaîne ouverte) est plus simple que le système réel (avec 20 degrés de liberté en chaîne ouverte)
- Travailler entièrement en simulation, c'est à dire dans un environnement plus tolérant face aux erreurs
- Se familiariser avec Symofros, un outil développé par l'Agence Spatiale Canadienne

Un scénario sera simulé qui comprend la prise d'un objet sur une table, le suivi d'une trajectoire désirée avec une force interne désirée, et l'application d'une force de contact désirée de l'objet sur un plan incliné.

4.2 Description du système

4.2.1 Topologie du système

Le système simulé présenté à la figure 4.1 consiste en deux robots planaires à trois degrés de liberté chacun, tenant un objet rigide. Les paramètres des liens du robot ont été choisis pour refléter le système réel CART afin que les ordres de grandeurs des forces, des positions, vitesses et accélérations soient réalistes. En effet, les longueurs et les masses des trois liens sont très proches de trois liens successifs et presque co-planaires du CART : la troisième, la quatrième et la cinquième. Le tableau suivant donne le détail des masses et longueurs du système simulé.

TAB. 4.1 Paramètres du robot simulé

Paramètre	longueur	masse
Lien 1	1m	13kg
Lien 2	1m	24kg
Lien 3	0.5m	5kg
Objet	0.5m	5kg

4.2.2 Description de l'environnement

Un environnement a été modélisé pour permettre une interaction avec l'objet. Il consiste en un sol surélevé par rapport au robot sur lequel l'objet peut être posé, et en un plan incliné sur lequel l'objet peut appliquer une force. La force de contact avec l'environnement dépend de l'enfoncement du centre de masse de l'objet dans la surface selon une loi de type ressort, $f = K_r x$. La constante de raideur K_r est fixé à 1000 N/m. Cette valeur est faible afin de visualiser l'enfoncement de l'outil dans l'environnement, et d'éviter les instabilités numériques. La géométrie de l'environnement est montrée sur le schéma présentant le scénario (4.2)

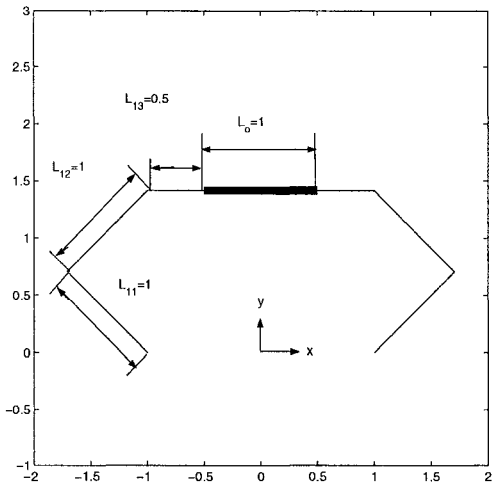


FIG. 4.1 Topologie du système

4.2.3 Environnement de programmation

Tous les développements en simulation sont faits dans l'environnement Matlab / Simulink / Stateflow version R13. Un outil développé à l'Agence Spatiale Canadienne et nommé Symofros v5.0 a été utilisé de façon intensive. Cet outil permet la génération symbolique de modèles de systèmes mécaniques de configurations diverses, comprenant des liens aussi bien rigides que flexibles. En fonction d'une topologie donnée de robot, Symofros permet de générer les matrices de masse, les vecteurs non linéaires, les différentes matrices jacobiennes, d'effectuer la cinématique directe, en fonction de la topologie, des états du système et des forces appliqués au système. Cet outil est utilisé aussi bien pour la simulation du système que pour sa commande. La génération des modèles de manière symbolique a l'avantage de simplifier les termes simplifiables analytiquement. Les modèles générés sont ainsi moins exigeants en ressource et plus exacts qu'un modèle généré numériquement. Toutes ces fonctionnalités sont entièrement intégrées à l'environnement de travail Matlab / Simulink. De plus, le modèle généré est contenu dans un fichier compilé

(.dll). L'intégration permet alors d'allier la souplesse d'utilisation des langages interprétés Matlab / Simulink avec la rapidité de calcul du modèle Symofros compilé.

Les étapes pour la génération et l'utilisation de modèles Symofros sont les suivantes :

- Génération de la topologie du système dans un « Model Editor » sous Simulink. Chaque lien est caractérisé en terme de masse, de longueurs, de degré de liberté, de position et d'orientation par rapport au joint précédent.
- Envoie du modèle pour la génération du modèle symbolique par Maple, sur les serveurs de l'ASC.
- Compilation locale des fichiers générés et retournés par les serveurs de l'ASC.
- Appel du modèle compilé à travers les blocs Simulink de Symofros pour l'utilisation en simulation.

4.3 Développements

4.3.1 Modélisation du système

En utilisant la méthodologie pour la génération de modèles Symofros détaillée dans la section précédente, un modèle correspondant à la topologie de la section 4.2.1 a été généré. Les équations de contrainte sont spécifiées dans le modèle. Il est possible d'obtenir la matrice de masse et le vecteur non linéaire avec ou sans les effets des équations de contraintes. Il est donc possible de résoudre le système en chaîne fermée et en chaîne ouverte. Lorsqu'en chaîne ouverte, les deux robots deviennent indépendants et l'objet n'est plus soumis aux forces exercées par les robots. L'objet est alors soumis seulement à la gravité.

4.3.2 Modélisation de la commande

La commande présentée au chapitre 3 est implémentée dans Simulink. Elle bénéficie des modèles de Symofros notamment pour la linéarisation exacte. Dans un système réel, la linéarisation exacte utilisée dans la commande ne peut utiliser qu'un estimé des paramètres cinématiques et dynamiques, comme le montre l'équation 3.7. Dans le système simulé, les paramètres sont connus exactement. Cependant, afin d'introduire volontairement des erreurs dans le modèle de la loi de commande, le modèle Symofros est dupliqué. Des erreurs liées aux longueurs et aux masses des liens peuvent être incorporées volontairement dans le modèle utilisé dans la commande afin d'en tester la robustesse.

4.3.3 Machine à état fini

Le module de simulation comprend une machine à état fini permettant de gérer différents modes d'opération selon les demandes de l'opérateur. La machine à état fini est implémentée à l'aide de Stateflow. Les commandes disponibles à l'utilisateur sont :

- Interrupteur « Général Marche-Arrêt »
- Interrupteur « Mode Attaché-Détaché »
- Interrupteur « Commande du bras 1 Marche-Arrêt »
- Interrupteur « Commande du bras 2 Marche-Arrêt »
- Interrupteur « Commande de la force interne Marche-Arrêt »

Quand l'interrupteur « Général »est en marche, l'interrupteur « Mode Attaché-Détaché »permet de passer de la chaîne ouverte à la chaîne fermée si les outils sont suffisamment proches de leur point de prise, et de la chaîne fermée à la chaîne ouverte sans condition, afin de pouvoir lâcher la pièce à tout moment. L'interrupteur « Commande du bras 1 »permet de passer du mode commandé au mode non commandé. Ce mode permet notamment la validation du modèle détaillé à la section 4.4. Si le bras est commandé, la machine à état fini sélectionne la commande appropriée selon la mode de fonctionnement en chaîne ouverte ou fermée. Enfin, si le système est en chaîne fermée et que les deux bras sont commandés, alors le dernier interrupteur listé permet de commander ou non la force interne.

Cependant, ces fonctionnalités doivent être utilisées avec attention car les changements d'état peuvent introduire des discontinuités dans la commande. De plus, certains artifices permettant de gérer ce genre de discontinuités, tel que le « anti wind up device », n'ont pas été implémentés.

4.3.4 Génération de trajectoire

La génération de trajectoire implémentée est basée sur un polynôme de cinquième ordre définit à l'équation 4.1. L'utilisation d'un ordre 5 pour le polynôme permet de pouvoir fixer les positions, vitesses et accélération voulues au début et à la fin de la trajectoire désirée, pendant un temps voulu ($\Delta t = t2 - t1$), et de générer une trajectoire unique pour satisfaire ses conditions. Ce module est utilisé pour la position et l'orientation dans le cas de la simulation, c'est à dire en 2D. Cependant, l'orientation doit être traitée différemment dans le cas en 3D. Le détail des calculs dans ce cas précis 3D n'est pas donné ici.

$$x(t) = \frac{a_5}{120}t^5 + \frac{a_4}{24}t^4 + \frac{a_3}{6}t^3 + \frac{a_2}{2}t^2 + a_1 t + a_0 \text{ avec } t \in [t1, t2] \tag{4.1}$$

$$\dot{x}(t) = \frac{a_5}{24}t^4 + \frac{a_4}{6}t^3 + \frac{a_3}{2}t^2 + a_2 t + a_1 \text{ avec } t \in [t1, t2] \tag{4.2}$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{a_5}{6}t^3 + \frac{a_4}{2}t^2 + a_3 t + a_2 \text{ avec } t \in [t1, t2] \tag{4.3}$$

Les coefficients du polynôme a_i sont déterminés en résolvant l'équation algébrique linéaire suivante :

$$\begin{bmatrix} x(t1) \\ \dot{x}(t1) \\ \ddot{x}(t1) \\ x(t2) \\ \dot{x}(t2) \\ \ddot{x}(t2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{t1^5}{120} & \frac{t1^4}{24} & \frac{t1^3}{6} & \frac{t1^2}{2} & t1 & 1 \\ \frac{t1^4}{24} & \frac{t1^3}{6} & \frac{t1^2}{2} & t1 & 1 & 0 \\ \frac{t1^3}{6} & \frac{t1^2}{2} & t1 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{t2^5}{120} & \frac{t2^4}{24} & \frac{t2^3}{6} & \frac{t2^2}{2} & t2 & 1 \\ \frac{t2^4}{24} & \frac{t2^3}{6} & \frac{t2^2}{2} & t2 & 1 & 0 \\ \frac{t2^3}{6} & \frac{t2^2}{2} & t2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}$$

Les coefficients a_i ainsi obtenus sont utilisés dans les équations 4.1, 4.2, et 4.3 pour déterminer l'évolution de la position, de la vitesse et de l'accélération dans le temps. Une fois la position obtenue pour un instant donné, il est préférable de ne pas obtenir la vitesse et l'accélération par dérivation numérique de la position afin d'éviter les inexactitudes de la dérivation numérique détaillée plus loin (section 4.3.7), et donc d'éviter les incompatibilités entre les positions, vitesses, et accélérations désirées.

Le calcul précédant doit se faire en parallèle dans toutes les dimensions de l'espace pour générer la trajectoire voulue dans l'espace, c'est à dire $[x, y, \theta]$ dans notre cas en 2 dimensions.

4.3.5 Visualisation et animation

Le banc de test numérique comprend un module de visualisation permettant de visionner l'évolution de tous les paramètres principaux dans le temps :

- Positions/orientations du bras 1, $[x_1, y_1, \theta_1]_M(t)$
- Positions/orientations du bras 2, $[x_2, y_2, \theta_2]_M(t)$
- Positions/orientations de l'objet, $[x_o, y_o, \theta_o]_M(t)$
- Forces/moments internes à l'objet, $[F_{int}]_O(t)$
- Forces/moments de contact de l'objet sur l'environnement, $[F_{env}]_M(t)$
- Forces/moments mesurés à l'outil 1, $[f_1]_M(t)$
- Forces/moments mesurés à l'outil 2, $[f_2]_M(t)$
- Couples appliqués aux joints du bras 1, $\tau_1(t)$
- Couples appliqués aux joints du bras 2, $\tau_2(t)$
- Distances entre les outils et les points de prise, $d1(t)$ et $d2(t)$

Le banc de test numérique comprend aussi un module d'animation exécutable une fois la simulation terminée. Cette animation est utilisée en grande partie pour la validation du modèle, et pour vérifier le comportement du système avant la visualisation des courbes mentionnées précédemment. Elle présente de façon schématique les deux robots, l'objet, et l'environnement. La liste des paramètres nécessaires pour l'animation est donnée ci bas :

- Coordonnées généralisées du bras 1, q_1
- Coordonnées généralisées du bras 2, q_2
- Coordonnées généralisées de l'objet, q_o

– Longueur de tous les liens des robots et de l'objet

4.3.6 Dérive numérique

Pour assurer la stabilité numérique du système en chaîne fermé, des gains nommés « Paramètres de Baumgarte » sont fixés lors de la génération du modèle dans Symofros. Ces paramètres correspondent à des gains d'une boucle de retour utilisée pour réguler la distance entre chaque bras et son point de prise respectif vers zéro. Ils permettent d'éviter une dérive de la distance entre les outils et leurs points de prise respectifs sur l'objet. En effet, les équations de contrainte du système robot-objet sont fixées au niveau de l'accélération. La résolution numérique n'étant pas exacte, elle peut induire une accélération différente de zéro entre les outils et les robots. La double intégration fait alors intervenir une dérive au niveau de la position. Ces paramètres ont été choisis par essai-erreur, et sont donnés ci-dessous.

TAB. 4.2 Paramètres de Baumgarte

Paramètres	Valeurs
K1	80
K2	40

4.3.7 Dérivation numérique

L'erreur introduite par dérivation numérique influence la conception du module de simulation. En effet, cette erreur conduit à interdire toute dérivation de signaux dans l'environnement Simulink. Tous les signaux liés par dérivation, tels que la position, la vitesse et l'accélération, ont été déterminés par intégration de la plus haute dérivée ou par l'équation analytique associée.

4.3.8 Boucle algébrique

Dès lors que la commande dépend d'une force déduite à partir d'une accélération, une boucle algébrique intervient dans un système simulé. En effet, la loi de commande ne dépend pas alors seulement des états du système mais aussi de la plus haute dérivée présente dans le système, l'accélération. L'entrée du système simulé à un instant donné (t), c'est à dire le calcul de la commande, nécessite la connaissance de la sortie au même instant (t), à savoir l'accélération du système. Ce cas de figure se présente pour l'annulation de la dynamique du système qui nécessite de calculer l'accélération de l'objet x_o en fonction des positions et vitesses de chacun des joints de chaque robot. Ce cas de figure ce présente aussi pour le calcul des forces internes et de contact qui nécessite de traiter les forces f obtenues par résolution du système augmenté (équation 2.3). Cependant, le cas de boucle algébrique ne se présente pas lorsqu'en chaîne ouverte car les forces de contact dépendent alors des états du système et non de leurs dérivées.

Simulink peut simuler un système commandé comprenant des boucles algébriques en utilisant un algorithme itératif pour chaque pas de temps. Cependant, les temps de calcul augmentent et la convergence n'est pas assurée. Il n'y a pas de problème de boucle algébrique avec les états du système car ils sont obtenus par intégration, leurs conditions initiales étant fixées dans les intégrateurs.

Afin de casser cette boucle algébrique, il est nécessaire d'introduire un délai d'un pas de temps dans la boucle. L'entrée du système simulé à un instant donné (t) nécessite alors la connaissance de la sortie à l'instant précédent $(t-\Delta t)$. À l'instant $t = 0$, le calcul de la commande se base sur les conditions initiales données au niveau du délai. Cependant, l'utilisation de délai doit être évitée car elle peut rendre le

système commandé instable. Notons que ce problème ne se pose qu'en simulation.

4.4 Validation

La validation du modèle vise à tester la cinématique, la dynamique, et la commande du système. Les erreurs décelées lors de la validation ont été corrigées. Le banc d'essai est considéré opérationnel.

4.4.1 Validation de la cinématique

Afin de valider la cinématique, plusieurs configurations en chaîne fermée à l'équilibre ont été testées. Les positions et orientations de l'objet et de l'outil données par le module de visualisation ont été comparées aux valeurs déterminées manuellement.

4.4.2 Validation de la dynamique

La dynamique a été validée dans un premier temps en chaîne ouverte en vérifiant le comportement des deux robots et de l'objet. L'objet rebondit sur le sol sans perte d'énergie, et les deux robots se comportent comme des pendules à trois liens. Les mêmes tests sont effectués en posant la gravité à zéro.

Une deuxième série de tests vise à placer le système en chaîne fermée dans une configuration particulière à l'équilibre, puis à vérifier les forces dans le module de visualisation. En chaîne fermée, le calcul de la force de contact de l'objet avec l'environnement est vérifié en appliquant une force connue à l'objet.

4.4.3 Validation de la commande

La vérification de la commande se fait en chaîne ouverte dans un premier temps. En donnant au contrôleur une connaissance parfaite de la dynamique du système, et une erreur nulle pour tous les états à l'instant $t = 0$, on vérifie un suivi de trajectoire parfait.

En plaçant un mur à mi chemin entre les deux robots avec une force de contact exercée par le mur de type $F = K_r x$, nous pouvons vérifier le comportement des contrôleurs par impédance de chaque bras.

En chaîne fermée, nous pouvons constater un suivi de trajectoire parfait pour l'objet. La gestion de la force de contact avec l'environnement et le comportement des variables de sélection μ_x et μ_f est aussi testée.

La robustesse de la résolution numérique du système est vérifiée en pratiquant des tests de traction et de compression de l'objet. Pour ceci, le système est en chaîne fermée. La position désirée d'un des robots est maintenue fixe alors que la position désirée de l'autre robot vise à étirer l'objet pourtant rigide en contournant les équations de distribution. La résolution diverge après un écart de position de 0.1 m, alors que les forces internes induites sont de l'ordre de 10^{15}.

4.5 Conditions de simulation

4.5.1 Définition du scénario

Un scénario représentant trois phases d'opération est simulé, tel que présenté à la figure (4.2). Les trois phases sont indiquées sur chaque graphique donné plus bas et sont séparées par des pointillés. Elle correspondent à :

- Phase I : Prise de l'objet posé au sol (position $[0, 0.4905, 0]^T$) par les deux robots en chaîne ouverte.
- Phase II : Passage en chaîne fermée et transport de la pièce vers la position $[0.2, 1.5, \pi/12]^T$ et avec une force interne désirée ($50N$). Le temps est laissé aux paramètres de Baumgarte pour stabiliser le système. Notons que le contact éventuel entre les outils et l'objet n'est pas considéré tant que le mode en chaîne fermé n'est pas activé, et que les éventuelles collisions ne peuvent pas être détectées.
- Phase III : Application d'une force de contact désirée entre l'objet et l'environnement ($50N$), perpendiculaire au plan incliné. La commande en force externe est activée grâce aux variables $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 1$.

Ce scénario est simulé en considérant une connaissance parfaite de la dynamique du système, puis en introduisant volontairement des incertitudes paramétriques de l'ordre de 20% au niveau de la linéarisation exacte. L'effet de délai dans la commande n'est pas étudié.

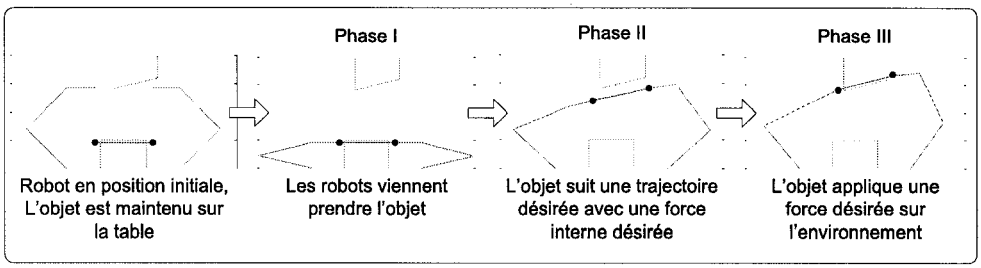


FIG. 4.2 Scénario

4.5.2 Choix des gains

Les gains des couples pré-calculés sont choisis par essai-erreur de façon à satisfaire les contraintes de couples maximum applicables sur le système réel CART ($1500N.m$). La dynamique obtenue en considérant une linéarisation parfaite de la dynamique est caractérisée par les pôles $p_1 = -11.3$ et $p_2 = -8.46$ et $p_3 = -0.209$.

$$K_{i_P} = [100, 100, 100]^T \text{ avec } i = 1, 2$$
$$K_{i_I} = [20, 20, 20]^T$$
$$K_{i_D} = [20, 20, 20]^T$$

L'impédance désirée aux outils des robots est donnée ci dessous. Elle place les pôles en $p_1 = -8.87$ et $p_2 = -1.13$. Les pôles sont à partie imaginaire nulle pour éviter tout comportement oscillatoire du robot face à une force.

$$M_{i_des} = [10, 10, 10]^T \text{ avec } i = 1, 2$$
$$B_{i_des} = [100, 100, 100]^T$$
$$K_{i_des} = [100, 100, 100]^T$$

L'impédance désirée au niveau de l'objet est identique à celle des bras.

$$M_{des} = [10, 10, 10]^T$$
$$B_{des} = [100, 100, 100]^T$$
$$K_{des} = [100, 100, 100]^T$$

4.6 Résultats de simulation

Les deux approches présentées à la section 3.8.2 pour les contrôleurs d'impédance, celle de Bombardier et celle de Bonitz et Hsia, ont été essayées. Elles donnent tous les deux des résultats identiques.

4.6.1 Commande en position

Les performances en chaîne ouverte, correspondant à l'approche des bras vers l'objet, ne sont pas analysées pour se concentrer sur la commande au niveau de l'objet. Le passage de la chaîne ouverte à fermée est sain. Cependant, ce passage ne peut pas être traité de manière rigoureuse sur ce banc de test numérique car les forces de contact ne sont pas modelées en chaîne ouverte, et car les paramètres de Baum-

garte font converger les distance des bras à leur point de prise vers zéro, même si la phase d'approche n'est pas précise.

Une fois en chaîne fermée, la figure 4.3 montre des performances de suivi de trajectoire parfait avec une parfaite connaissance de la dynamique. Avec l'ajout d'incertitudes paramétriques (figure 4.4), l'erreur en position est de 1% et l'orientation est de 30%. La loi de commande a donc une robustesse limitée.

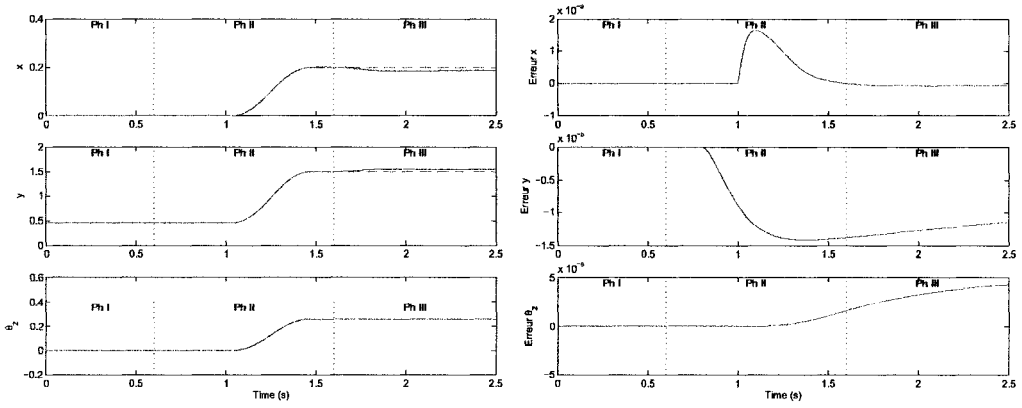


FIG. 4.3 Positions/orientations de l'objet réelles (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), et erreur en positions/ orientations, dynamique connue

4.6.2 Commande de la force interne

Les performances de la commande de la force interne sont mises en évidence lors des phases II et III pour chacun des graphiques présentés. Avec une linéarisation parfaite de la dynamique, la figure 4.5 montre une erreur en force interne très faible (0.001%). Avec des incertitudes paramétriques, l'erreur en force interne se dégrade significativement comme le montre la figure 4.6. L'erreur est proche de 30% en phase transitoire, lorsque l'erreur en suivi de trajectoire est de moins de

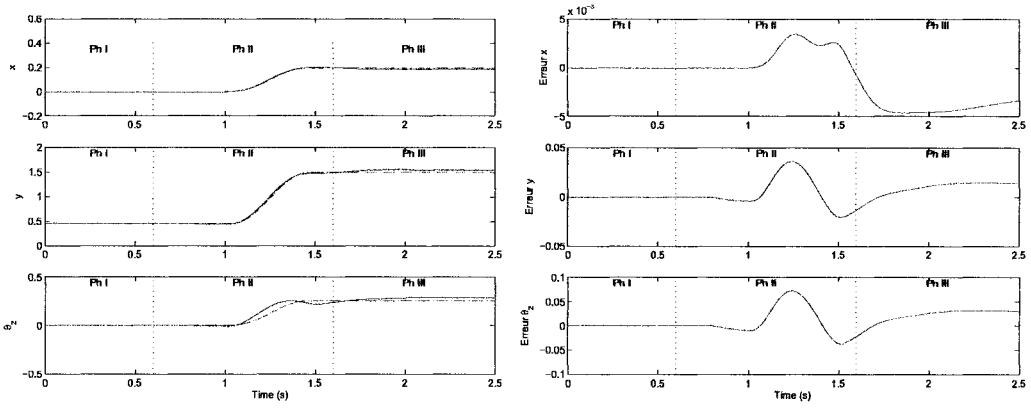


FIG. 4.4 Positions/orientations de l'objet réelles (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), et erreur en positions/ orientations, dynamique incertaine

1%. L'erreur en force diminue à moins de 1% lorsque la position désirée ne varie plus. Avec des incertitudes plus grandes, le système peut diverger. Nous constatons donc qu'une commande précise en position est un prérequis important pour assurer une commande précise sur la force interne.

Ces essais en simulation illustrent qu'avec une connaissance parfaite de la dynamique, la loi de commande peut accommoder un suivi de trajectoire et un contrôle en force interne parfait simultanément. Lorsqu'il y a des erreurs de modélisation, le compromis entre un bon suivi de trajectoire et une bonne régulation de la force interne dépend des gains des couples pré-calculés et des commandes par impédance.

4.6.3 Commande de la force externe

La force externe est commandée quand l'objet est suffisamment proche du plan incliné, et que les variables de sélection le permettent ($\mu_x = 0$ et $\mu_f = 1$), lors de la phase III. Dans les deux cas de connaissance parfaite ou avec des incertitudes de

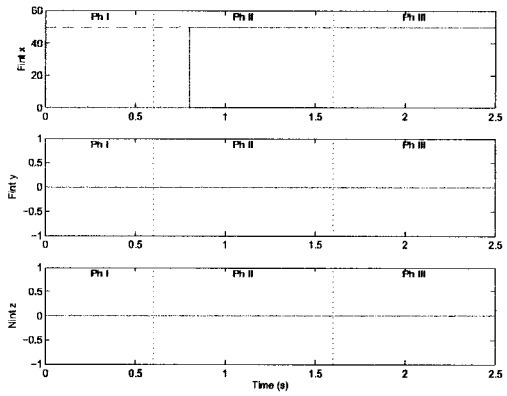


FIG. 4.5 Forces/moments internes à l'objet, réels (-) et désirés (--), dynamique connue

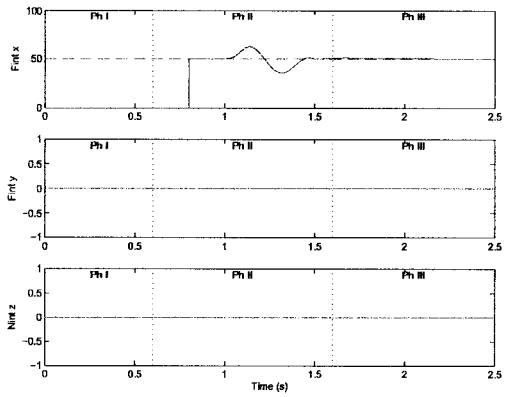


FIG. 4.6 Forces/moments internes à l'objet, réels (-) et désirés (--), dynamique incertaine

la dynamique, la force externe converge vers la valeur désirée avec une dynamique différente relativement similaire (figures 4.7 et 4.8).

Le changement de trajectoire dû à force externe désirée peut être observée sur les graphiques des positions, aux figures 4.3 et 4.4.

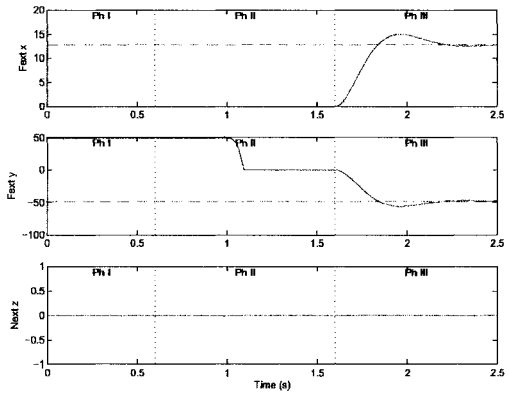


FIG. 4.7 Forces/moments externes à l'objet réels (-) et désirés (--), dynamique connue

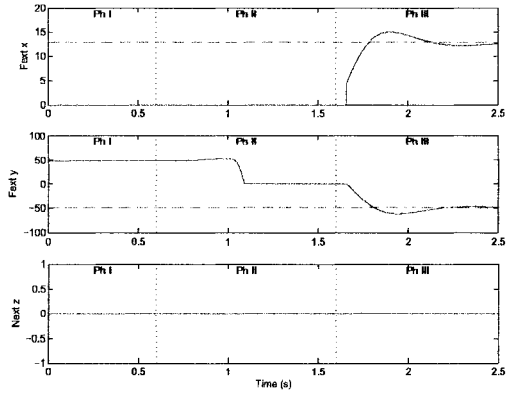


FIG. 4.8 Forces/moments externes à l'objet réels (-) et désirés (--), dynamique incertaine

4.7 Conclusions

La loi de commande proposée semble applicable. La simulation montre que toutes les quantités commandées peuvent converger vers leurs valeurs désirées quand la connaissance de la dynamique est parfaite. Cependant, de faibles erreurs en position peuvent résulter en de grandes erreurs en force interne dans le cas d'une connaissance imparfaite de la dynamique. La commande de la force externe est moins affectée par ces incertitudes. Il est maintenant possible de poursuivre avec l'expérimentation sur le système réel CART.

CHAPITRE 5

EXPÉRIMENTATION

5.1 Introduction

Suite à la démonstration de la validité de la loi de commande par voie de simulation, au chapitre 4, l'implémentation sur le système réel CART (« CSA Automation and Robotics Testbed ») est alors poursuivie.

5.2 Description du système

5.2.1 Topologie du système

Le système expérimental CART illustré à la figure 5.1, est composé de deux bras de 7 degrés de liberté chacun, dont la topologie est définie par les paramètres de Denavit-Hartemberg suivants :

TAB. 5.1 Paramètres de Denavit Hartemberg pour STM1

Lien	a (mm)	α (deg)	d (mm)	θ (deg)
1	183.8279	89.9945	0	1.223829
2	212.7035	90.9036	174.1646	-0.720318
3	873.4699	179.86	0	0.180259
4	836.6120	0.8652	0	-0.550318
5	243.8967	-90.1830	177.7026	5.052664
6	243.7471	-89.7894	200.7	0.228426
7	0	0	0	0

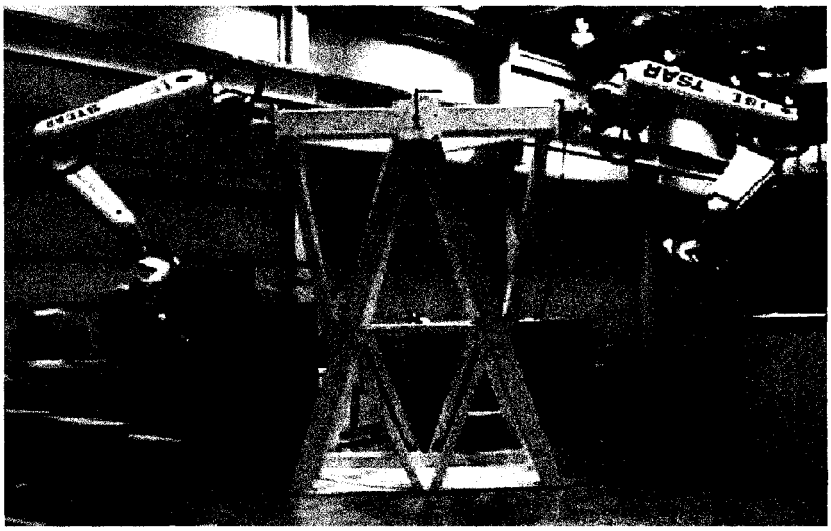


FIG. 5.1 Photo du système expérimental CART

TAB. 5.2 Paramètres de Denavit Hartemberg pour STM2

Lien	a (mm)	α (deg)	d (mm)	θ (deg)
1	-171.823	90.177	0	1.52548
2	-212.973	89.9062	175.088	1.2302
3	-834.195	179.9368	0	0.0208
4	-837.286	-0.01378	0	-0.2049
5	-242.259	-89.8799	171.583	-2.8294
6	-244.232	-89.9761	201.498	-0.2245
7	0	0	0	0

Les référentiels sont donnés aux figures 5.2 et 5.3

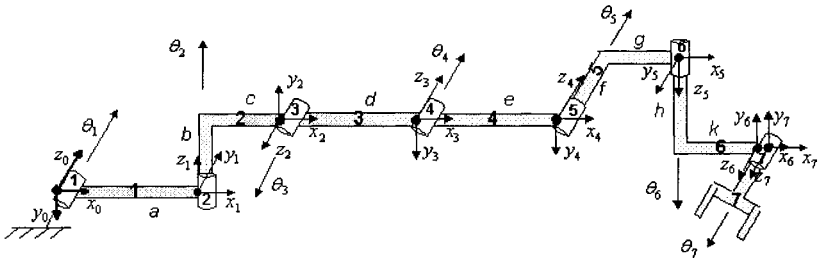


FIG. 5.2 Référentiels des joints pour STM1

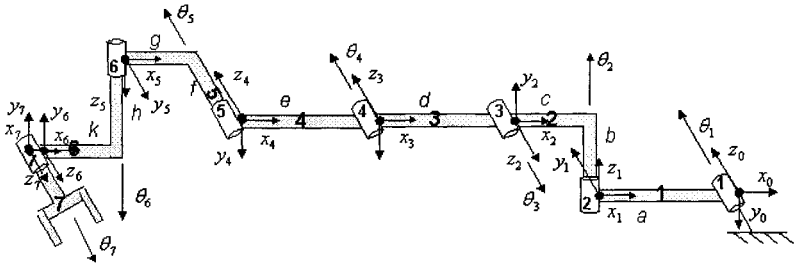


FIG. 5.3 Référentiels des joints pour STM2

Les spécifications détaillées du CART, tel que les limites de joints, les paramètres dynamiques, la résolution des encodeurs sont données par Shadpey (Shadpey, 1999).

5.2.2 Description de l'environnement

Les robots doivent interagir avec l'objet, une barre de métal rigide. L'objet devra aussi entrer en contact avec l'environnement consistant en une barre de métal attachée horizontalement. Tous les contacts peuvent être considérés comme rigides.

5.2.3 Environnement de programmation

5.2.3.1 Matériel

Le matériel informatique et électrique consiste en une batterie d'amplificateurs de puissance pour chaque robot, puis en une batterie de PCs de type commerciaux qui exécutent le code en temps réel sur des stations QNX, et qui sont reliés entre eux par des liens « firewire ». Deux nœuds QNX doivent être utilisés pour le fonctionnement de chaque bras. L'opérateur envoie des instructions aux robots et reçoit les informations sur un autre poste PC. Le protocole de communication avec le réseau de station en temps réel est le TCP/IP, ce qui ne garantit donc pas l'envoi et la réception de données en temps réel. Les trois critères limitatifs pour la phase de développement dus au matériel informatique sont :

- le traitement logiciel qui limite la quantité de données maximale transférable d'un nœud à l'autre à 2048 byte/s (soit 256 données de type « double ») par les liens « firewire » ;
- la vitesse d'écriture sur les disques durs de 3Mo/sec qui limite la quantité de données enregistrables en temps réel pour fin d'analyse ;
- la capacité de calcul des stations en temps réel qui impose une distribution de la charge de calcul sur les différents nœuds QNX.

5.2.3.2 Logiciel

La génération des modèles se fait dans l'environnement Matlab/Simulink/Stateflow sous Windows. Les modèles du CART ont été générés par Symofros et sont ainsi utilisés dans Simulink. Une fois testés, les diagrammes Simulink doivent être organisés pour pouvoir être interfacés avec RT-Lab.

Le logiciel RT-Lab exécute les tâches suivantes :

- Séparation du code pour le parallélisme
- Génération du code C sur la machine locale
- Compilation du code sur un nœud QNX

Le système d'exploitation des ordinateurs commandants les robots en temps réel est QNX. L'accès à cet OS se fait à travers le réseau par le logiciel Phindows dans l'environnement Windows.

L'opération des robots en temps réel se fait par RT-Lab sur Windows. L'interface permet de charger le code sur les noeuds QNX puis de demander l'exécution du code. L'envoi des commandes aux bras robotisés et la réception des données se font à travers une console Simulink. Étant donnée l'architecture matérielle, l'envoi et la réception des donnés se font par le protocole TCP/IP et ne sont donc pas déterministes.

5.3 Développements

Les développements sont présentés succinctement ici. Plus de détails sont donnés dans le guide d'usager destiné à l'ASC (Prévot, 2004), autant pour l'aspect opérationnel, que pour les détails d'implémentation.

5.3.1 État de développement au début du projet

L'architecture de contrôle disponible au début ou en cours de projet permet de commander séparément chaque bras en choisissant parmi une batterie de contrôleurs

pour permettre la commande :

- En position dans l'espace des joints
- En vitesse dans l'espace des joints
- En vitesse dans l'espace cartésien
- En couple placé en bas niveau afin de compenser la friction dans la modèle

Elle permet aussi de gérer différentes fonctionnalités :

- HLS (« Hardware in the Loop Simulation »)
- FMA (« Force/Moment Accomodation »)
- Système de vision
- Station de commande à distance
- Entrée de données par une manette
- Contrôle de différents outils (main SARAH, outil de MD-Robotics...)

Enfin, les systèmes de sécurité permettent de gérer les modes d'arrêt d'urgence dans les cas suivants :

- Position limite d'un joint
- Vitesse limite d'un joint
- Mesure élevée du capteur de force JR3
- Grande erreur au niveau d'un contrôleur
- Approche d'une configuration singulière
- Position et vitesse désirée critiques
- Couple mesuré limite

La charge de calcul est répartie comme suit :

- Un nœud dédié aux opérations de bas niveau. Il traite les informations brutes reçues et à envoyées aux robot à travers la carte d'acquisition, et gère les modes de sécurité de base.

- Un nœud dédié aux opérations de haut niveau qui contient les contrôleurs, les différentes fonctionnalités et les systèmes de sécurité.

Étant donné que les diagrammes ne peuvent pas communiquer entre eux, le travail consiste d'abord à développer le coordonnateur qui distribue les commandes aux hauts niveaux de chacun des bras. Ensuite, il est nécessaire d'implémenter un type de contrôleur non disponible dans la batterie existante, à savoir un contrôleur en position dans l'espace cartésien, incluant une commande par impédance pour la gestion de la force interne. Enfin, une console doit être mise en place pour envoyer les commandes et recevoir les informations pertinentes spécifique à l'opération en mode coopératif. Les développements sont mis en évidence à la figure 5.4. Enfin, les développements proposés ont dû s'intégrer de manière transparente dans l'architecture existante.

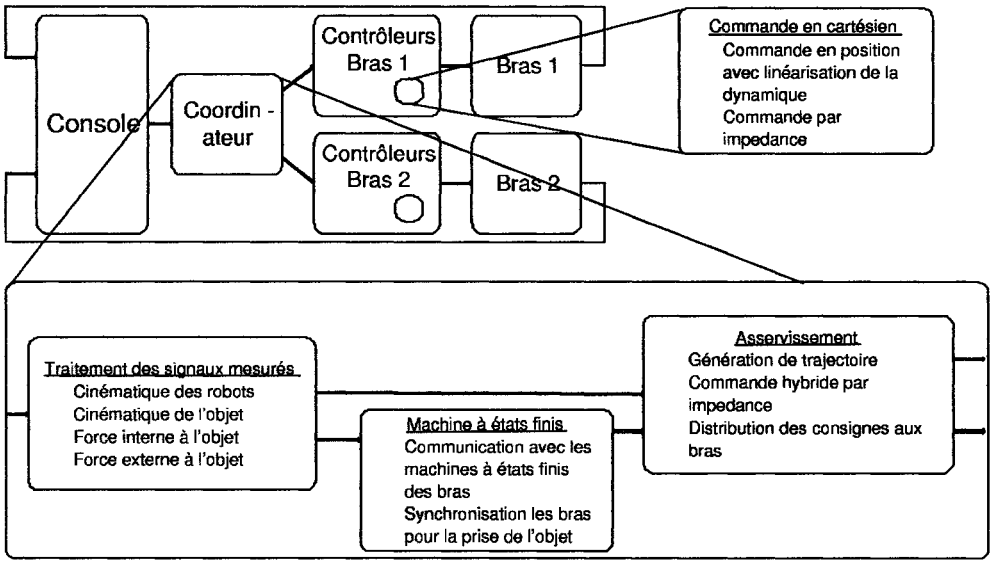


FIG. 5.4 Ajout à l'architecture existante

5.3.2 Implémentation des contrôleurs au niveau des bras

La commande en position dans l'espace cartésien correspond au couple pré-calculé détaillé dans le chapitre 3. Étant donné que chaque bras correspond à un système redondant, il existe plusieurs façons de calculer l'inverse de la jacobienne de chaque robot. Deux approches sont implémentées :

- Faire l'inverse de la jacobienne seulement sur 6 joints au lieu de 7 afin d'éliminer la redondance et donc d'avoir une solution unique pour l'inverse de la jacobienne. Cela suppose de bloquer physiquement un joint du robot ;
- Utiliser l'inverse de Moore-Penrose, c'est à dire avec une matrice de pondération identité. Le critère minimisé est alors la somme des vitesses au carré. Le détail est donné au chapitre 3.

5.3.3 Implémentation du coordonnateur

Le coordonnateur s'articule autour des trois modules présentés sur le graphique 5.4, à savoir le « Traitement des signaux mesurés », la « Machine à état fini », et l' « Asservissement ». Il doit s'adapter à l'utilisation en mono-robot autant qu'en multi-robot. Il doit utiliser les entrées du système existant, à savoir une console, et une entrée destinée au HLS (« Hardware in the Loop Simulation »). Les signaux envoyés par la console sont de type asynchrone, alors que les signaux envoyés par le HLS sont de type synchrone et sont acheminés directement et sans traitement (génération de trajectoire, filtre...) aux différents contrôleurs. Ces derniers signaux sont donc utilisés pour envoyer les commandes en position et en force. Les signaux des consoles sont alors utilisés pour gérer le mode de fonctionnement de chaque robot, pour gérer la séquence d'initialisation amenant à la prise de la pièce, et pour imposer la force interne désirée.

Seule la machine à état fini est brièvement détaillée ici. Elle permet de gérer les modes de fonctionnement des deux bras simultanément. La séquence d'action menant à une configuration en chaîne fermée en mode multi-robot est :

- Prise de contrôle des consoles de chaque bras par la machine à état fini ;
- Envoi d'une série de requêtes à chaque bras afin d'activer les contrôleurs par impédance, et de piloter la séquence d'initialisation du mode HLS qui va positionner chaque robot vers leur point de prise de l'objet ;
- Passage en mode HLS pour chacun des bras. Les positions et les forces désirées sont alors envoyées de manière continue par le coordonnateur selon la position désirée de l'objet ;
- Fermeture des pinces de chaque bras pour passer en chaîne fermée ;
- Générations de trajectoires si l'objet est considéré immobile, ou activation de la lecture d'un fichier de donnés Matlab (.mat) pour le suivi de trajectoires préprogrammées.

En cas de signal d'erreur à tout moment ou d'arrêt volontaire du mode multi-robot, le système ouvre la pince de l'outil du bras STM2 afin d'ouvrir la chaîne et de libérer les contraintes éventuelles, et place chaque robot en pause. Un signal d'erreur est généré lorsque :

- un des deux bras entre en mode « critique », ou « arrêt d'urgence » ;
- la force interne à l'objet dépasse un certain seuil (150 N).

5.3.4 Implémentation de la console

La console permet l'opération des robots en temps réel. Celle mise en place pour le mode multi-robot comprend :

- les informations relatives aux modes d'opération (mode mono ou multi-robot, position désirée, force interne désirée, force externe désirée, envois de requêtes,

mise en fonction du suivi de trajectoire pris d'un fichier) ;
- les informations relatives à l'objet (position/orientation des référentiels des points de prise par rapport au centre de masse, masse, inertie) ;
- la visualisation des données acquises (position, force interne, force externe, état de la machine à état fini).

5.3.5 Outils divers

Pour permettre l'analyse des données obtenues en temps réel, des blocs d'acquisition permettent l'extraction des données pour chaque bras et pour l'objet. Les fichiers générés sont volumineux (environ 0.5 Mb/s). Les scripts Matlab pour l'analyse des données ont été développés.

Les blocs de génération de trajectoire développés pour la simulation ont été étendus au cas en trois dimensions, et ont été utilisés pour la génération de trajectoires hors-ligne dans des fichiers (.mat) pour fin d'expérimentation.

5.3.6 Implémentation temps réel

À cause d'un problème de transfert de données entre les nœuds QNX, un effort a dû être fait pour minimiser la quantité de données à transférer d'un nœud à un autre. Notamment, les paramètres liés aux bras calculés au niveau de l'objet ne sont pas transférés aux hauts niveaux des bras. Ces données sont donc re-calculés dans le haut niveau des bras. Ainsi, la capacité de transfert insuffisante est compensée par la puissance de calcul.

À cause de problèmes de surcharge de calcul sur le nœud QNX comprenant le co-

ordonnateur, le pas de temps a été augmenté localement. Ainsi, la commande des bras se fait à 1000 Hz, alors que la commande du coordonnateur se fait à 125 Hz. Les paramètres cinématiques désirés, et les forces internes réelles et désirées sont donc calculées à 125 Hz, puis traitées par les contrôleurs de chaque bras à 1000 Hz.

Nous pouvons nous attendre à une dégradation des performances de la commande en force à cause de sa sensibilité à la période d'échantillonnage. En effet plusieurs articles (Bonitz, 1996) et (Wen, 1992) mentionnent le caractère critique du délai lorsque la dérivée des états est utilisée dans une loi de contrôle pour un système en temps réel, c'est à dire lorsque la force est utilisée dans la loi de commande. Ce problème s'apparente à celui de boucles algébriques rencontré en simulation. Au niveau du concept, il faut considérer qu'une force réellement appliquée à un temps t sera utilisée dans la loi de commande à un temps $t + 1$. Or l'application de forces peut se fait de manière instantanée dans le cas de contact rigide, et la différence entre la force réelle et la force utilisée dans la loi de commande peut donc être grande entre t et $t + 1$. Il est nécessaire que la dynamique assignée dans la commande par impédance n'induise pas des variations de force trop élevées pour un pas de temps donné. Il existe donc une relation entre les gains des contrôleurs par impédance et la période d'échantillonnage. Cette relation est présentée par Bonitz (Bonitz, 1996) mais elle ne s'applique pas à la formulation du contrôleur choisie. Cette relation dans notre cas n'a pas fait l'objet de recherches rigoureuses.

5.4 Validation

La validation a consisté à tester chacun des trois modules qui composent le coordonnateur, puis à tester en simulation la séquence d'initialisation menant à la chaîne fermée. Cependant, la phase de fonctionnement en chaîne fermée n'a pu être

validée en simulation car les modèles des bras correspondent à des diagrammes distincts. Modéliser le comportement en boucle fermé aurait nécessité la création de nouveaux modèles Symofros comprenant les 40 états du système en chaîne fermée.

La validation de la commande par impédance a cependant pu se faire sur les robots. Les outils furent positionnés selon un système d'axe connu, et des forces furent appliquées selon tous les axes.

5.5 Conditions d'expérimentation

5.5.1 Définition du scénario

Un scénario similaire à celui en simulation est mis en place. Il est aussi composé des trois phases suivantes :

- Phase I : Prise de l'objet posée au sol, à la position $[0.9, 0, -0.9, 0, 0, 0]^T$, par les deux robots en chaîne ouverte.
- Phase II : Passage en chaîne fermée et transport de la pièce proche de son point de contact avec l'environnement avec une force interne désirée $(15N)$. Le positionnement se fait en deux étapes. La première vise à aller vers $[0.8, 0, -0.9, -15, 0, 0]^T$ pour tester le comportement de l'objet en rotation. La deuxième amène l'objet vers $[0.8, -0.12, -0.9, 0, 0, 0]^T$ pour le positionner en face de l'environnement. Afin d'améliorer le comportement du robot en chaîne fermée, les contrôleurs par impédance liés aux couples n'ont pas été activés.
- Phase III : Application d'une force de contact désirée entre l'objet et l'environnement $[-10, 0, 0, 0, 0, 0]^T N$, perpendiculaire à l'environnement. La commande en force externe est activée grâce aux variables $\mu_x = 0$ et $\mu_f = 1$. Contrairement à la commande par impédance liée à chaque robot, celle liée à l'objet est activée

selon tous les axes.

Deux séries de tests ont été effectués, la première avec les contrôleurs par impédance en fonction, et la deuxième sans aucun des trois contrôleurs par impédance activé. Les données seront ensuite comparées aux résultats de simulation obtenus par l'équipe de Bombardier.

5.5.2 Choix des gains

Les gains des couples pré-calculés ont aussi été choisis par expérimentation sur le bras STM2. Les mêmes gains ont été choisis pour les deux bras malgré le fait que chacun ait un comportement distinct dû notamment à la friction. Le gain intégral est posé à zéro afin d'éviter d'exciter le système lorsqu'en chaîne fermée. La dynamique désirée de l'erreur en considérant un modèle connu parfaitement est caractérisée par les pôles $p_{1,2} = -25 \pm 13.2i$ en position et $p_1 = -189$ et $p_2 = -10.6$ en orientation.

$$K_{i_P} = [800, 800, 800, 2000, 2000, 2000]^T \text{ avec } i = 1, 2$$
$$K_{i_I} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$
$$K_{i_D} = [50, 50, 50, 200, 200, 200]^T$$

L'impédance désirée a été déterminée par placement de pôles. Les pôles choisis ($p_1 = -8$ et $p_2 = -5$) sont à partie imaginaire nulle pour éviter tout comportement oscillatoire du robot face à une force.

$$M_{i_des} = [40, 40, 40, 40, 40, 40]^T \text{ avec } i = 1, 2$$
$$B_{i_des} = [520, 520, 520, 520, 520, 520]^T$$
$$K_{i_des} = [1600, 1600, 1600, 1600, 1600, 1600]^T$$

L'impédance désirée au niveau de l'objet est aussi obtenue par placement de pôles ($p_1 = -7.31$ et $p_2 = -0.683$).

$$M_{des} = [40, 40, 40, 40, 40, 40]^T$$
$$B_{des} = [320, 320, 320, 320, 320, 320]^T$$
$$K_{des} = [200, 200, 200, 200, 200, 200]^T$$

5.6 Résultats d'expérimentation

Les essais avec les contrôleurs par impédance ont été effectués à deux reprises et des mesures très similaires indiquent que le comportement du robot est répétable.

Notons que tous les graphiques obtenus en expérimentation pour les deux tests sont inclus dans les annexes B et C. Seuls les graphiques les plus pertinents sont inclus dans ce chapitre. Comme pour la simulation, les trois phases du scénario détaillé plus haut sont indiquées sur chaque graphique.

Les deux approches détaillées à la section 3.8.2 pour les contrôleurs d'impédance,

celle de Hogan (Hogan, 1987) et celle de Whitney (Whitney, 1987), respectivement reprises par Bombardier et par Bonitz et Hsia, ont été testées. Seule la formulation de Whitney s'est avérée stable. Les raisons de l'instabilité de la commande formulée par Hogan n'ont pas fait l'objet de recherches rigoureuses. Cependant, il faut considérer que la commande en force et en position de Whitney est dissociée. Des perturbations non appliquées à l'outil sont vues comme une perturbation par la commande en position. Des perturbations bornées à l'outil ou des bruits de mesure des capteurs de force n'ont qu'un effet borné sur la trajectoire désirée. Le comportement est donc stable tant que le dynamique assignée pour le contrôle en position est plus rapide que celle de la commande en force. Selon l'autre approche, l'analyse est moins évidente car toute perturbation peut affecter la régulation de la force et de la position simultanément.

Comme prévu précédemment, le choix des gains pour les contrôleurs par impédance s'est avéré critique, probablement à cause de la période d'échantillonnage augmentée au niveau de coordonnateur. Par exemple, l'utilisation de gains 4 fois inférieures rendait le système en chaîne fermé instable. Changer tous les gains d'un facteur donné n'affecte pas la dynamique assignée mais affecte le gain statique. Ainsi, les variations de position pour une force donnée sont plus faibles, d'ou des variations de force plus faibles. Les performances de régulation de la force se trouvent limitées par la période d'échantillonnage.

5.6.1 Commande en position

5.6.1.1 Avec commande par impédance

Au niveau des bras, nous constatons une précision en position des bras de $\pm 2cm$ en position et de ± 5 deg en orientation sur la figure 5.5 autant en chaîne ouverte

que fermée. Ensuite, nous constatons que la transition en chaîne fermée se fait de manière stable.

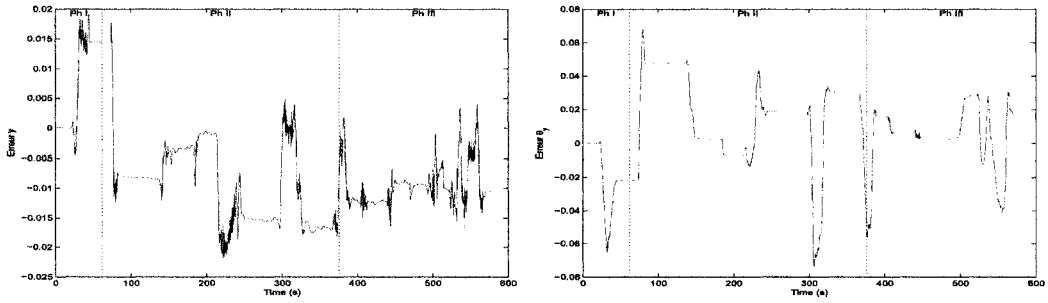


FIG. 5.5 Erreurs en positions/orientations selon y de STM2, cas avec impédance

Au niveau de l'objet, les suivis en position/orientation ont une précision de $\pm 8cm$ et de ± 3 deg. Les erreurs sont illustrées à la figure 5.7. Nous pouvons constater sur la figure 5.6 que les contrôleurs par impédance ont un effet important sur la position désirée sur la figure 5.6. Le couplage non désiré des mouvements selon différents axes est mis en évidence. En effet, le changement d'orientation θx après $t = 250s$ affecte la position selon x au même instant. Ce couplage est probablement dû à des erreurs de modélisation de la dynamique des bras qui affectent le positionnement de l'objet. En effet, la dynamique est parfaitement découplée seulement si elle est parfaitement linéarisée.

5.6.1.2 Sans commande par impédance

Lors de la désactivation des contrôleurs par impédance, nous constatons aux figures 5.8 et 5.9 que la précision du positionnement de l'objet est supérieure d'un facteur 2. Ce résultat est compréhensible car la force interne n'a plus d'effet sur la position désirée. Cependant, nous pouvons nous attendre à ce que les forces internes soient supérieures.

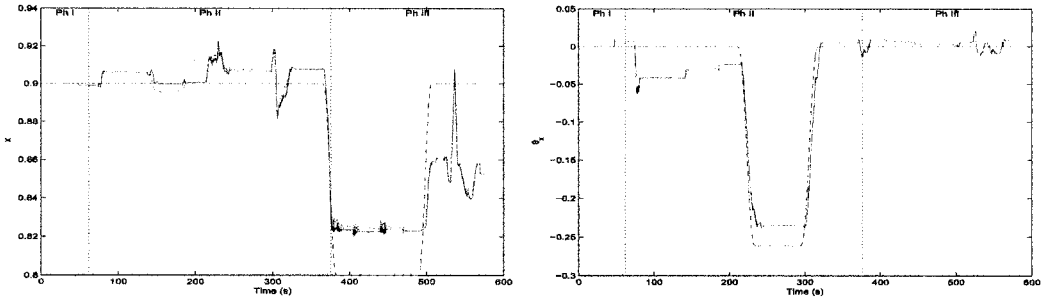


FIG. 5.6 Positions/orientations selon x de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), cas avec impédance

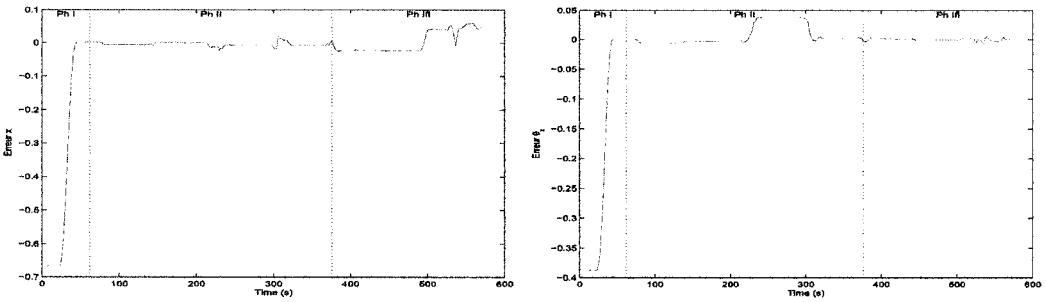


FIG. 5.7 Erreurs en positions/orientations selon x de l'objet, cas avec impédance

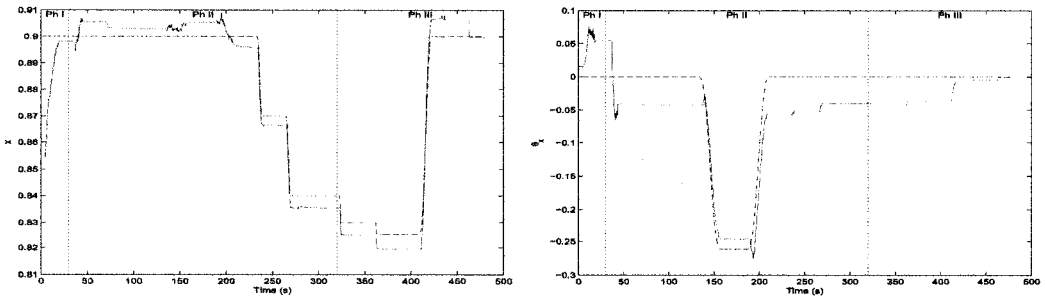


FIG. 5.8 Positions/orientations selon x de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.), cas sans impédance

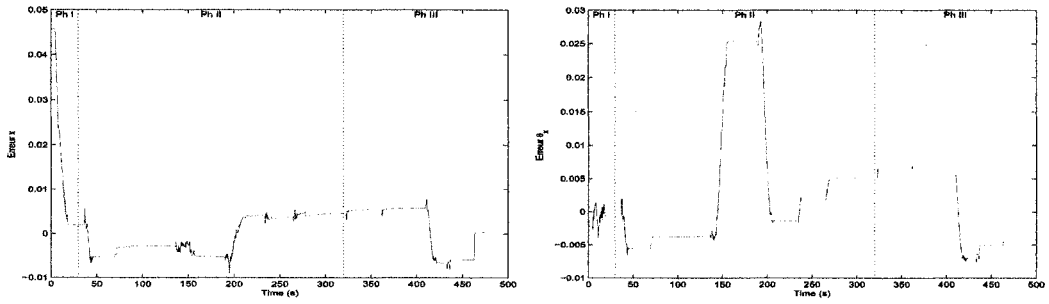


FIG. 5.9 Erreurs en positions/orientations selon x de l'objet, cas sans impédance

5.6.2 Commande de la force interne

5.6.2.1 Avec commande par impédance

Afin d'analyser correctement les phases pertinentes du scénario (II et III), il faut dissocier le comportement en régime transitoire et celui en régime permanent. Les erreurs de régulation en force interne sont grandes dans le régime transitoire, soit de $\pm 80N$ et $\pm 30N.m$, figure 5.10. Elles peuvent être en partie dues à la dynamique des outils non compensée. Cependant, les erreurs en régime permanent sont moins élevées, soit de $\pm 20N$ et $\pm 10N.m$. Aussi, nous constatons un décalage entre la force interne réelle et désirée de l'ordre de $\pm 20N$ sur le premier graphique. Nous vérifions que la transition en chaîne fermée se fait de manière stable.

5.6.2.2 Sans commande par impédance

Lors de l'arrêt des contrôleurs par impédance, nous constatons sur la figure 5.11 que la force interne atteint des valeurs semblables pendant le régime transitoire. Cependant, les performances en régime permanent sont très inférieures au cas avec la commande par impédance. Lorsque l'orientation de l'objet est changée, après

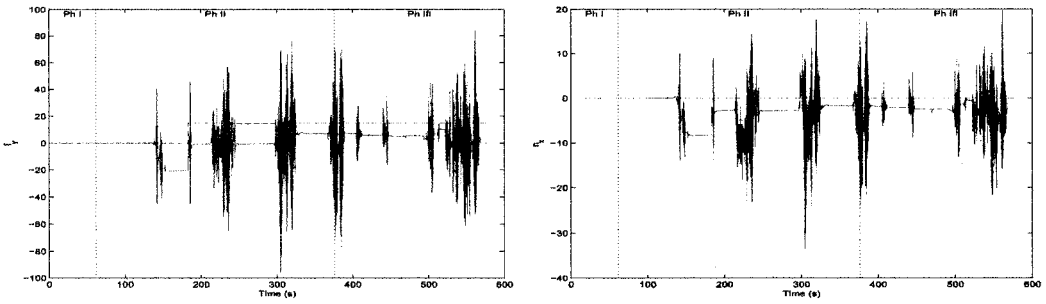


FIG. 5.10 Forces/moments internes, selon y et x respectivement, mesurés (-) et désirés (--) de STM2, cas avec impédance

$t = 150s$, des forces internes constantes d'environ $70N$ et $20N.m$ interviennent.

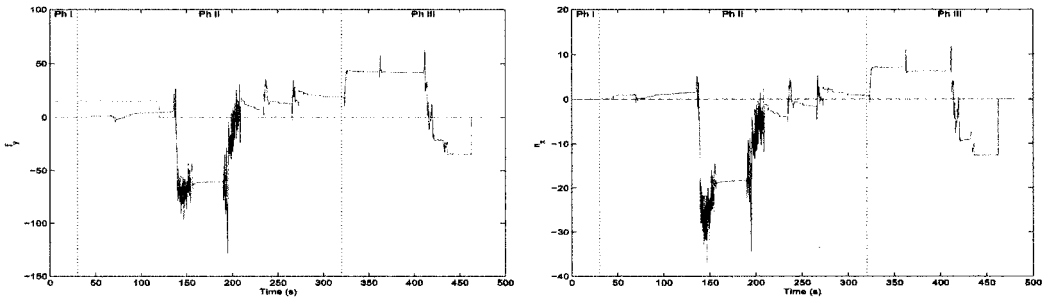


FIG. 5.11 Forces/moments internes, selon y et x respectivement, mesurés (-) et désirés (--) de STM2, cas sans impédance

5.6.3 Commande de la force externe

5.6.3.1 Avec commande par impédance

La force externe est sujette à des variations, pendant la phase transitoire, de l'ordre de $\pm 10N$ et $\pm 50N.m$, tel que montré sur la figure 5.12. Les erreurs en régime permanent sont de $\pm 3N$ et de $\pm 8N.m$.

Lors de la phase II, nous pouvons constater qu'une force de contact différente de zéro est calculée alors que l'objet est dans un espace non contraint. Ceci semble dû à des erreurs de dissociation entre force interne et force externe. En effet, cette dissociation est dépendante de la jacobienne de l'objet (J_o), dont le calcul est dépendant de la mesure de la position de chaque joint. Par exemple, l'élasticité au niveau des joints, qui est sollicitée en chaîne fermée, peut contribuer à rendre la dissociation imprécise.

Lors de la phase III, le contact est établi. Nous pouvons alors mettre en évidence, à la figure 5.12, une très bonne régulation de la force de contact autour de la valeur de $10N$, avec une précision de $\pm 0.5N$ lorsque les variables de sélection le permettent, entre $t = 450s$ et $t = 475s$. Les forces calculées pendant les autres périodes de temps, entre $t = 380s$ et $t = 400s$ et entre $t = 475s$ et $t = 500s$, confirment le comportement de la commande par impédance, à savoir que la force appliquée est un compromis entre la position et la force désirée quand les variables de sélection ne sont pas activées.

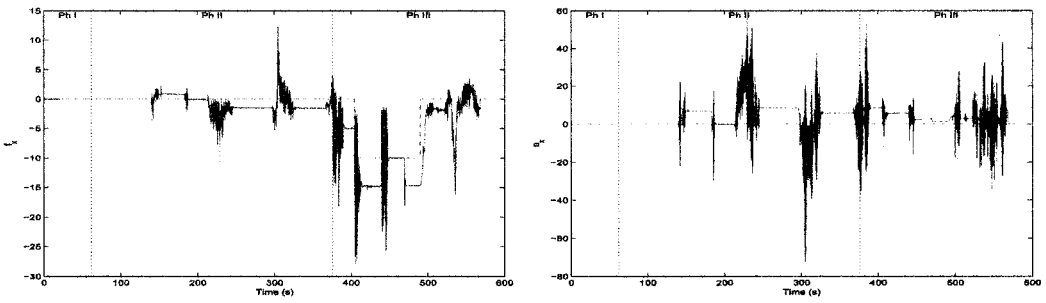


FIG. 5.12 Forces/moments, selon x, externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--), cas avec impédance

5.6.3.2 Sans commande par impédance

Lors de la désactivation des contrôleurs par impédance, figure 5.13, nous constatons qu'un moment de $40N.m$ est calculé lors de la phase II alors que l'objet est dans l'espace non contraint. Ce résultat peut venir du fait que l'élasticité des joints est plus sollicitée sans contrôleur par impédance, ce qui rend la dissociation des forces plus erronée. Il peut aussi être dû à l'absence de compensation de la gravité appliquée aux outils quand la position s'éloigne de celle d'initialisation des capteurs de force.

L'approche vers l'environnement, c'est à dire en phase III, s'est faite plus lentement mais le contact stable a pu être atteint. La force de contact est alors une conséquence directe de la position demandée. De faibles changements de position induisent des forces élevées, de $50N.m$. L'utilisation du contrôleur par impédance apporte alors un gain évident.

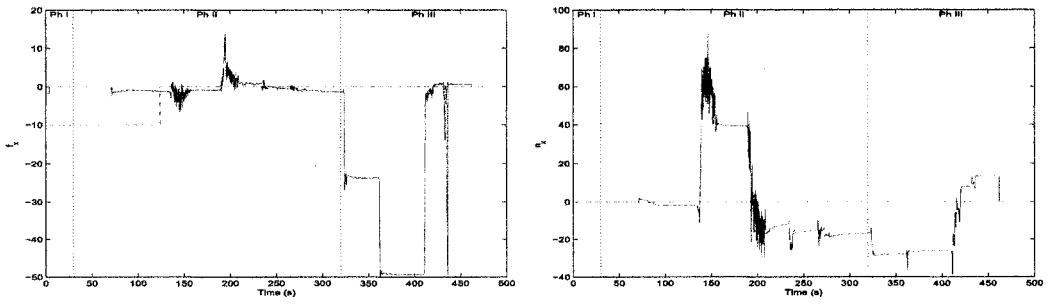


FIG. 5.13 Forces/moments externes à l'objet, selon x, mesurés (-) et désirés (--), cas sans impédance

5.7 Comparaison aux travaux de Bombardier

Les travaux de Bombardier ont été effectués sur le même système CART mais avec une infrastructure logicielle différente et avec un objet et des outils différents.

Les résultats de l'équipe de Bombardier sont similaires pour la position de l'objet. Ils sont meilleurs d'un facteur 4 pour la régulation de la force interne. Nous pouvons estimer que les meilleurs résultats viennent d'une meilleure précision de position des outils de chaque robot qui induit des forces internes et forces externes moins élevées. Enfin la régulation des forces externes dans l'espace non contraint a des performances similaires. Cependant, le rapport ne fait pas mention de tests impliquant un contact avec l'environnement.

5.8 Amélioration des performances

Le présent projet s'est concentré sur la mise en place de la loi de commande plutôt que sur l'optimisation des performances. Il existe alors une grande marge de manœuvre pour l'amélioration du système.

5.8.1 Axes de développement

Tout d'abord, des contrôleurs de couples développés en parallèle à mon travail sur le bras STM2 n'ont pas été intégrés dans mon projet. Ceux-ci permettent d'augmenter considérablement la précision de suivi en position jusqu'à l'ordre du millimètre en compensant la friction. Cependant, il faut prévoir que l'augmentation des performances s'accompagnera de perte de stabilité, la friction aidant à la stabilité du

système dans le régime permanent.

Les performances de la commande en force sont très dépendantes de la période d'échantillonnage. Le fait que la période d'échantillonnage soit de 125 Hz au niveau du calcul des forces internes et externes au lieu de 1000 Hz dans le reste du diagramme dégrade probablement beaucoup ses performances. L'utilisation de nœuds QNX plus puissants pourrait pallier ce problème.

La dynamique des outils n'est pas compensée et est donc considérée comme une force appliquée à l'outil dès que celui-ci s'éloigne de la position dans laquelle l'initialisation a été faite. La compensation de cette dynamique améliorerait sensiblement la régulation des force interne et externe.

Pour réguler la force de contact entre l'objet et l'environnement vers une valeur désirée, il faut connaître la grandeur, la direction, et le point d'application de la force qu'on veut appliquer. Les développements actuels ne permettent pas de spécifier un point d'application quelconque, autre que le centre de masse de l'objet, et une direction quelconque, autre que les axes du repère monde. Cette lacune pourrait être comblée pour rendre l'approche plus générale.

5.8.2 Axes de recherche

La démonstration mathématique de la stabilité de la loi de commande proposée n'a pas été trouvée dans la littérature scientifique, elle pourrait faire l'objet de recherches.

De plus, d'autres méthodes pour la dissociation entre la force interne et externe pourraient probablement augmenter les performances. Effectivement, la détermination des forces interne et externe réelles à partir des forces mesurées se base sur la jacobienne de l'objet (J_o) selon les équations $f_{int} = (I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T) f$ et $f_{ext} = J_o^{T\dagger} J_o^T f$. Cependant, J_o dépend de la position de l'objet et donc des mesures des angles de chaque joint des deux robots. Des imprécisions dans ces mesures des angles va conduire à dissocier une partie des forces appliquées aux outils en tant que force interne au lieu de force externe, et vice versa. Des erreurs de mesure des angles des joints ont été mises en évidence par expérimentation lorsque qu'une force est appliquée à l'outil. Elles sont en partie dues à l'élasticité des joints. Les erreurs de dissociations peuvent être facilement vérifiables, elles interviennent si une force externe différente de zéro est calculée lorsque l'objet est maintenu dans l'espace non contraint. Une approche pourrait être d'ajuster les axes des opérateurs de projection $(I_{6k} - J_o^{T\dagger} J_o^T)$ et $(J_o^{T\dagger} J_o^T)$ jusqu'à ce que la force externe dans l'espace non contraint tendent vers zéro. Ce type d'approche n'est pas traité à ma connaissance dans la littérature scientifique.

La commande par impédance permet un contact stable dans un environnement de géométrie inconnue mais avec une connaissance de l'impédance de l'environnement et du robot. L'ajustement dynamique des variables de sélection et des impédances désirées pourrait pallier ce problème. Dans un environnement de géométrie inconnue et sans système de vision, il est possible de faire avancer l'objet suffisamment lentement pour que les gains de la commande par impédance assurent un contact stable avec un environnement d'impédance connue. Cependant, dans le cas d'un environnement et d'un robot rigide, cette vitesse est très faible. Une autre approche est alors d'accepter une vitesse supérieure à cette limite quitte à provoquer un rebond lors du contact. Dans ce cas, des algorithmes de logique floue pourraient faire varier l'impédance désirée pour atténuer l'amplitude du prochain rebond jus-

qu'à atteindre un contact stable. L'information liée au contact peut permettre de déduire la position de l'environnement. Dans le cas d'un environnement dont la géométrie est connue, la logique floue pourrait agir sur les variables de sélection pour graduellement mettre l'emphase sur la force désirée, plutôt que sur la position désirée, quand l'objet s'approche du contact. Peu de travaux ont été vus dans ce domaine.

5.9 Conclusions

La loi de commande proposée a été implémentée avec succès. La prise de la pièce, sa manipulation et le contact entre l'objet et l'environnement se fait de façon stable. Cependant, les performances n'ont pas été optimisées par manque de temps. Plusieurs facteurs ont été identifiés pour expliquer les performances. Il apparaît que de légers ajustements des gains des différents contrôleurs pourraient améliorer les performances de façon significative. Des axes de développement et de recherche ont été proposés.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons développé et implémenté une loi de commande pour la coordination entre les deux robots du système CART, de l'Agence Spatial Canadienne (ASC). Cette approche est basée sur la commande hybride par impédance pour la gestion de la force de contact entre l'objet et l'environnement, sur la commande par impédance pour la gestion de la force interne à l'objet, et sur le couple pré-calculé pour la commande en position de chaque bras.

Ce projet se présentait en deux parties. La première visait à valider la loi de commande en simulation. Le module développé, incluant le procédé et la loi de commande, a permis de mieux comprendre les concepts et de se familiariser avec les outils disponibles à l'Agence Spatial Canadienne. Les résultats ont montré qu'un suivi de trajectoire et une régulation de la force interne et externe peuvent être atteints dans le cas de système connu parfaitement. Cependant, il a été mis en évidence qu'une erreur en position due à certaines incertitudes dans la modélisation du système peut résulter en de grandes forces internes. La gestion de la force externe a été satisfaisante dans tous les cas.

La deuxième partie visait à implémenter la loi de commande sur le système disponible à l'ASC. Les développements se concentraient surtout sur le coordonnateur qui distribue les commandes aux deux bras, et sur le contrôleur dans l'espace cartésien et la commande par impédance associée. Ils devaient s'insérer de façon modulaire dans une architecture de commande existante en temps réel. L'expérimentation a pu être conduite de manière concluante. Le comportement du système est stable en chaîne fermée, et lorsque l'objet établi un contact avec l'environnement. La régulation des forces internes est imprécise surtout dans les régimes transitoires. Les forces de contact et le positionnement de l'objet sont

régulés relativement précisément.

Le présent travail consistait surtout à mettre la loi de commande en place et à démontrer qu'elle est fonctionnelle. Les performances n'ont pas été optimisées. Il reste alors une marge de manœuvre pour l'amélioration des performances. Les propositions incluent la diminution de la période d'échantillonnage, la prise en compte de la direction et du point d'application de la force de contact désirée, l'implémentation de la compensation de friction, et la compensation de la dynamique des outils. Les axes de recherche proposés incluent la démonstration de la stabilité de la loi de commande proposée, l'adaptation des opérateurs de projection pour la dissociation des forces, et l'ajustement dynamique des variables de sélection et des impédances désirées pour mieux s'adapter à un environnement inconnu.

RÉFÉRENCES

F. Aghili, E. Dupuis, E. Martin et J.C. Piedboeuf, *Force/Moment Accommodation Control for Tele-Operated Manipulators Performing Contact Tasks in Stiff Environment*, In proceeding of the IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems, pt 4, vol 4, p 2227-33, 2001.

C.O. Alford et S.M. Belyeu, *Coordinated Control of Two Robot Arms*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1984.

R.J. Anderson et M.W. Spong, *Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators*, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol 4, no 5, 1988.

Bombardier Inc, Canadair, *STEAR 5, Phase 3, volume 2, final report*, 1999.

R.G. Bonitz et T.C. Hsia, *Internal force-based impedance control for cooperating manipulators*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 12, 1996

R.G. Bonitz et T.C. Hsia, *Force Decomposition in Cooperating Manipulators Using the Theory of Metrix Spaces and Generalized Inverses*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pt 2, vol 2, p 1521-7, 1994.

K. Chong Soo, P. Sei Seung et P. Chong Kug, *Robust Position, Motion-Inducing Force, and Internal Force Control for Multi-Robot Systems*, In proceeding of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, p 82-7, 1997.

J.J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, Addison-Welsley Publishing Company, 1986.

P. Dauchez, X. Delabarre et R. Jourdan, *Force Control of a Two-Arm Robot : Implementation on a Multiprocessor Architecture*, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, vol 1, p 487-92, 1990.

R. DeSantis, *Note de cours ELE-6207*, École Polytechnique de Montréal, 2002.

L. Han, J.C. Trinkle et Z.X. Li, *Grasp Analysis as Linear Matrix Inequality Problems*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 16, no 6, p 663-74, 2000.

S. Hayati, *Hybrid Position/Force Control of Multi-Arm Cooperating Robots*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986.

N. Hogan, *Impedance Control : An Approach to Manipulation, part I, II, III*, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol 107, 1985.

N. Hogan, *Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987.

P. Hsu, *Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems*, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol 9, 1993.

J.H. Jean et L.C. Fu, *An Adaptive Control Scheme for Coordinated MultiManipulators Systems*, IEEE Transaction on Robotics and Automation, n 2, vol 9, p 226-1, 1993.

S. Jung, T.C. Hsia, et R.G. Bonitz, *On Robust Impedance Force Control of Robot Manipulators*, Proceeding of the IEEE International conference on Robotics and Automation, pt 3, vol 3, p 2057-62, 1997.

O. Khatib, *A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators : The Operational Space Formulation*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol RA-3, 1993.

O. Khatib, K. Yokoi, K. Chang, D. Ruspini, R. Holmberg, A. Casal et A.Baader, *Force Strategies for Cooperative Tasks in Multiple Mobile Manipulation Systems*, International Symposium of Robotics Research, 1995.

C.C. Kopf et T. Yabuta, *Experimental Comparison of Master/Slave and Hybrid Two-Arm Position/Force Control*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989.

Y.H. Liu, S. Arimoto et T. Ogasawara *Decentralized Cooperation Control : Non Communication Object Handling*, Proceeding of the IEEE International conference on Robotics and Automation, pt 3, vol 3, p 2414-19, 1996

M.T. Mason, *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators*, IEEE Tansaction on Systems, Man, and Cybernetics, vol SMC-11, 1981.

J.K. Mills et D.M. Lokhorst, *Control of Robotics MAnipulators During general Task Execution : A Discontinuous Control Approach*, The International Journal of Robotics Research, vol 12, 1993.

A. Prévot, *Dual-arm operation of the CART : User Guide*, Agence Spatial Canadienne, 2004.

A. Pujas, P. Dauchez et F. Pierrot *Hybrid Position/Force Control : Task Description and Control Scheme Determination for a Real Implementation*, Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems, vol 2, p 841-6, 1993.

M.H. Raibert et J.J. Craig, *Hybrid Position/Force Control of Manipulators*, Transaction of the ASME, vol 102, 1981.

S.A. Schneider et R.H. Cannon Jr, *Object Impedance Control for Cooperative Manipulation : Theory and Experimental Results*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 8, no 3, 1992.

F. Shadpey, *CSA Automation and Robotics Testbed*, 1999.

D. Sun et J.K. Mills, *Adaptive Synchronized Control for Coordination of Two Robot Manipulators*, In proceeding of the IEEE International conference on Robotics and Automation, pt 1, vol 1, p 976-81, 2002.

J.T. Wen et K. Kreutz-Delgado, *Motion and Force Control of Multiple Robotic Manipulators*, Automatica, vol 28, pp 729-43, 1992.

D.E. Whitney, *Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control*, The International Journal of Robotics Research, vol 6, 1987.

D. Williams et O. Khatib, *The Virtual Linkage : A Model for Internal Force in Multi-Grasp Manipulation*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol 1, p 1025-30, 1993.

Y.F. Zheng et J.Y.S Luh, *Joint Torques for Control Of Two Coordinated Moving Robots*, IEEE Conference on Robotics and Automation, 1986.

W.H. Zhu et J. De Shutter, *Control of Two Industrial Manipulators Rigidly Holding and Egg*, IEEE Control Systems Magazine, n 2, vol 19, p 24-30, 1999.

ANNEXE I

GRAPHIQUES EXPÉRIMENTAUX AVEC COMMANDE PAR IMPÉDANCE

I.1 Objet

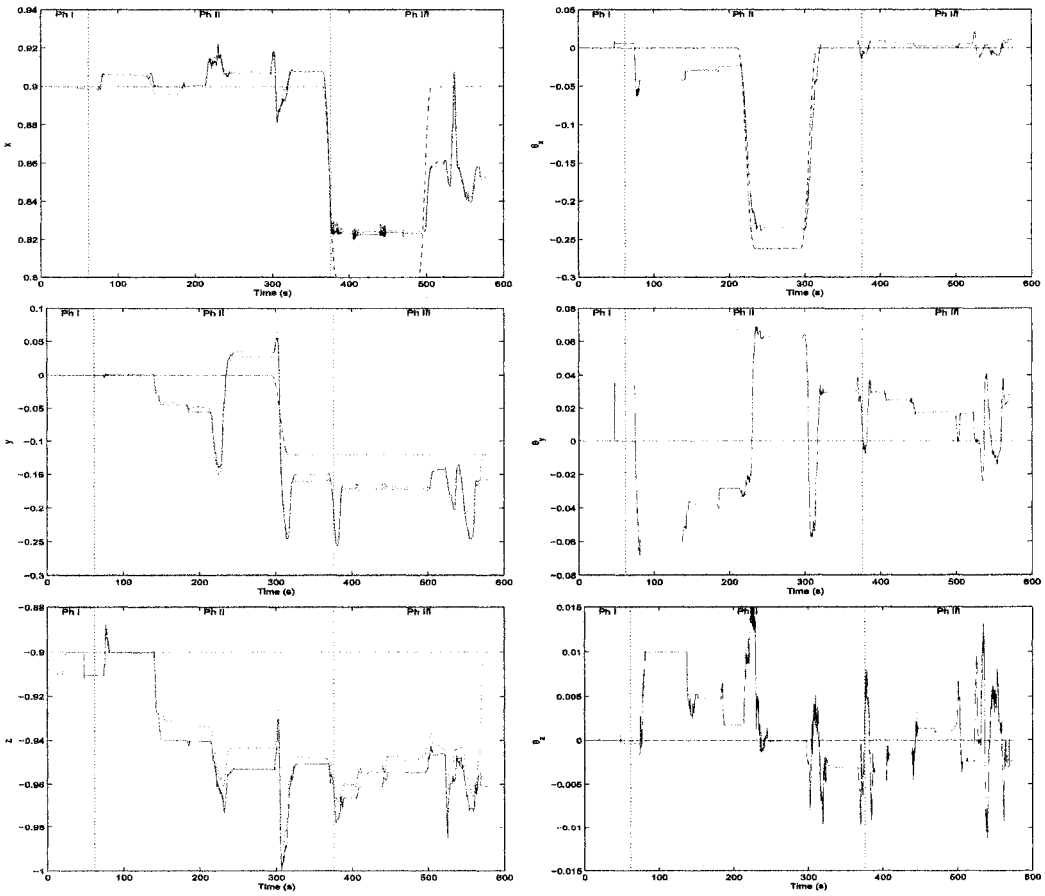


FIG. I.1 Positions/orientations de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.)

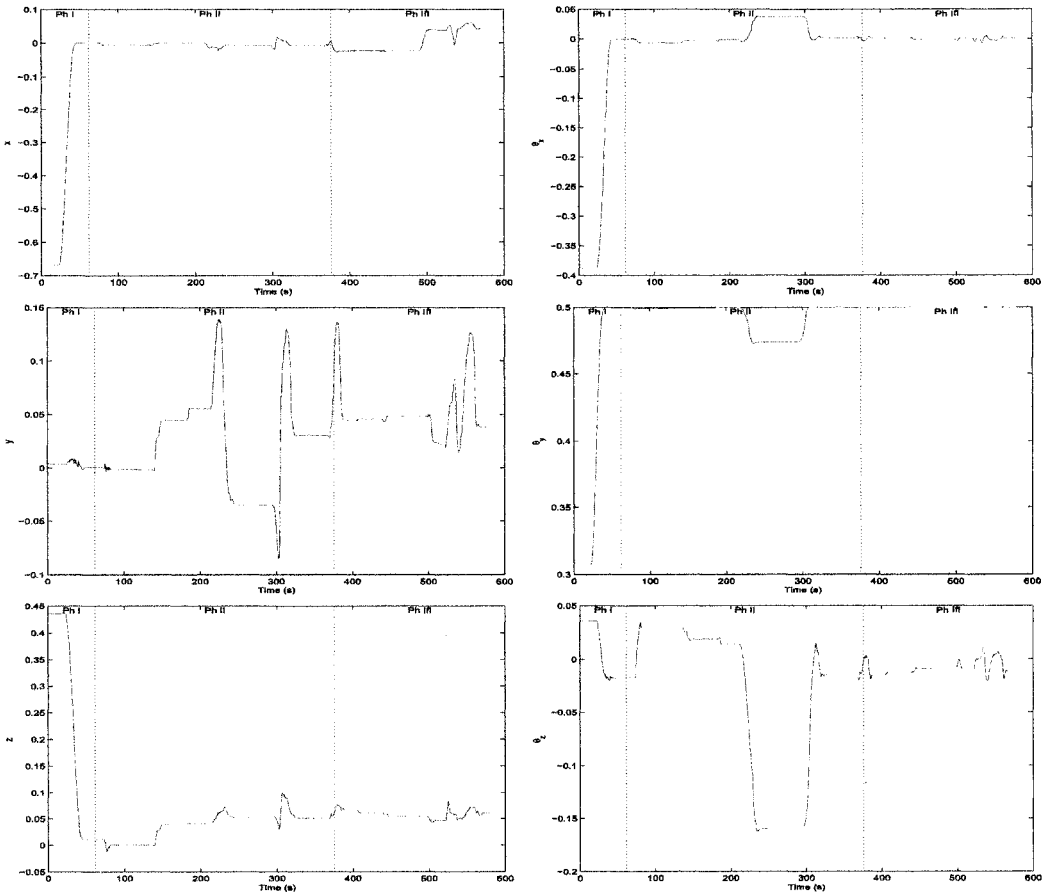


FIG. I.2 Erreurs en positions/orientations de l'objet

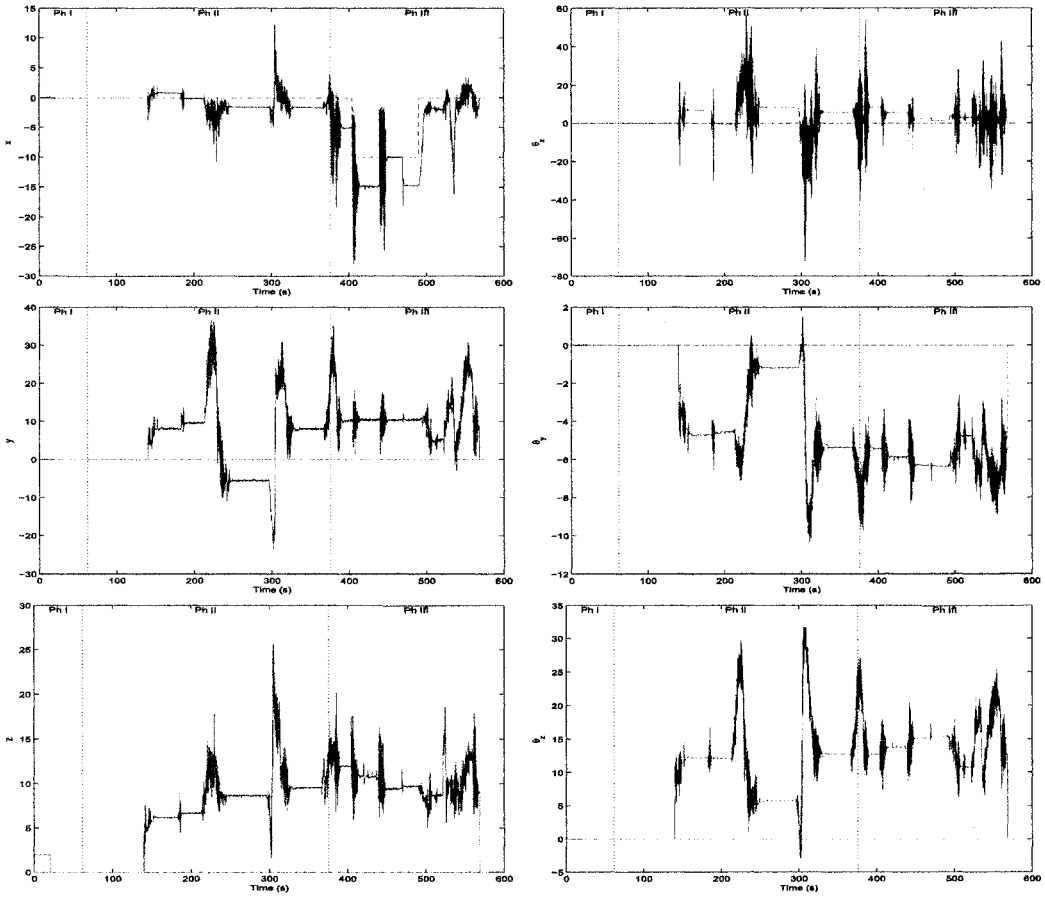


FIG. I.3 Forces/moments externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--)

I.2 STM1

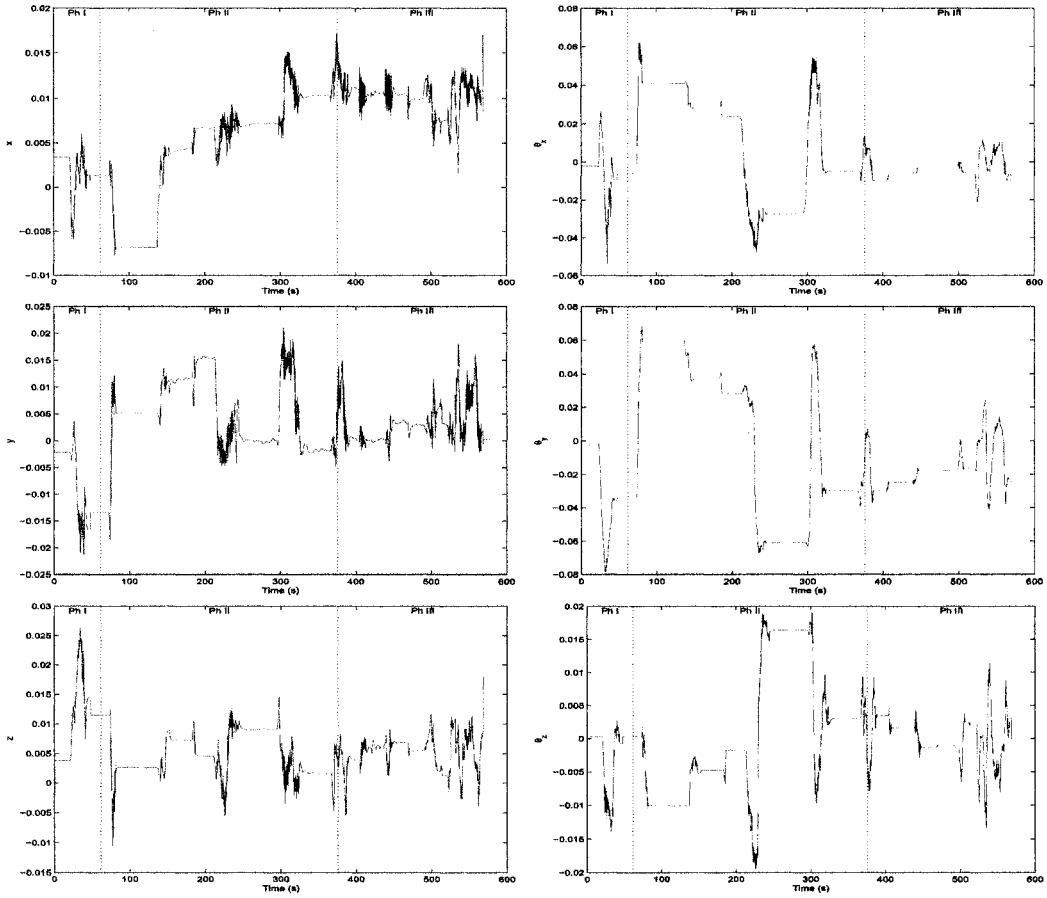


FIG. I.4 Erreurs en positions/orientations de STM1

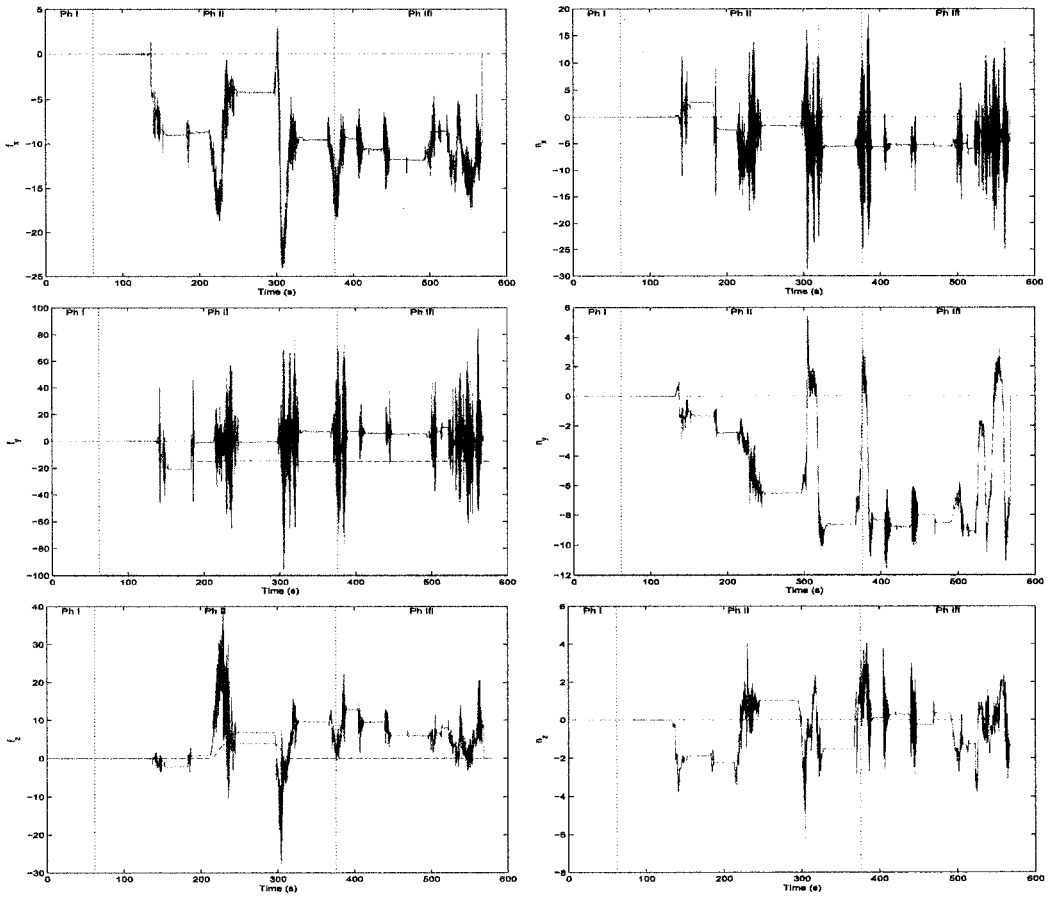


FIG. I.5 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM1

I.3 STM2

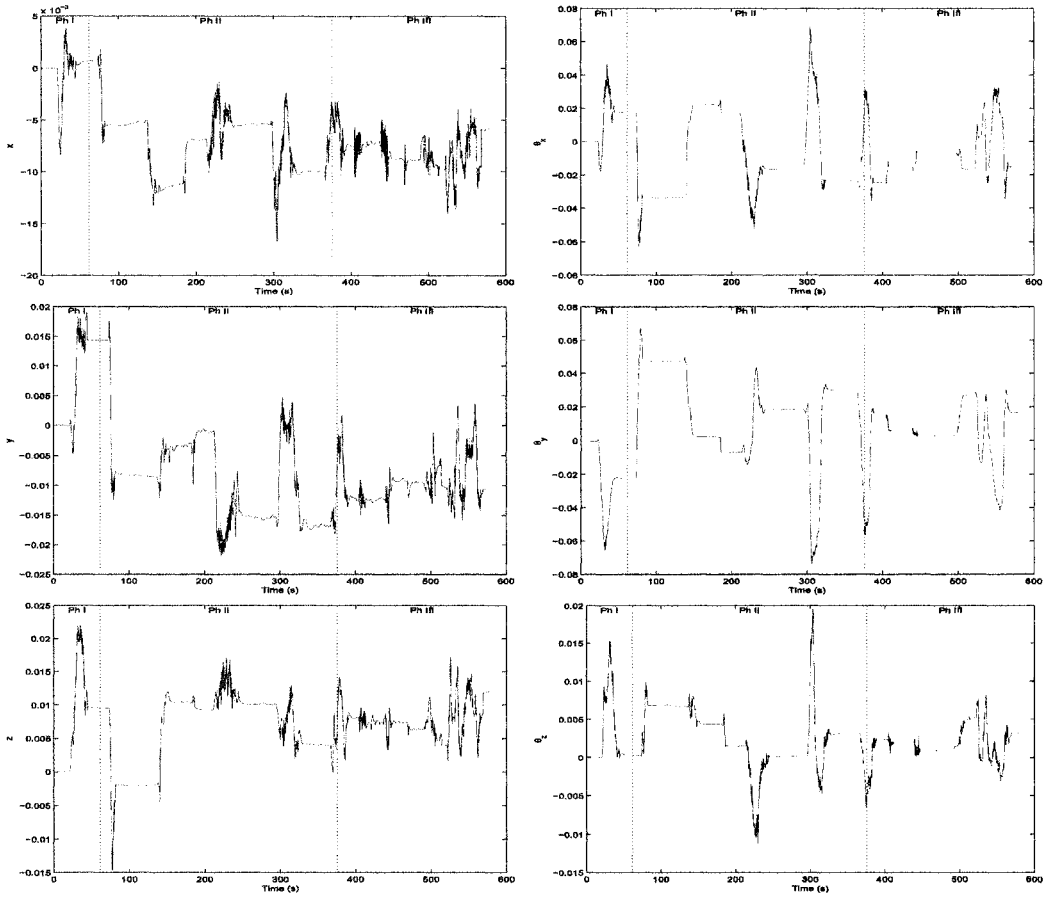


FIG. I.6 Erreurs en positions/orientations de STM2

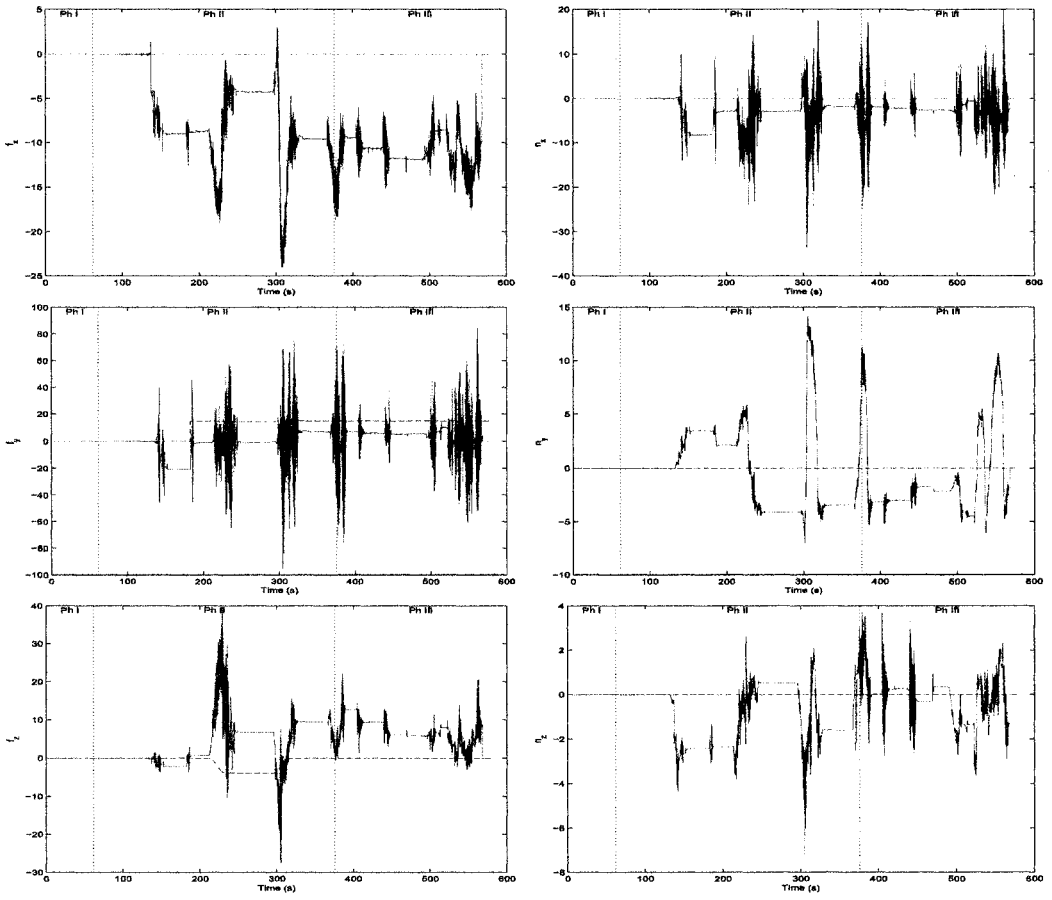


FIG. I.7 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM2

ANNEXE II

GRAPHIQUES EXPÉRIMENTAUX SANS COMMANDE PAR IMPÉDANCE

II.1 Objet

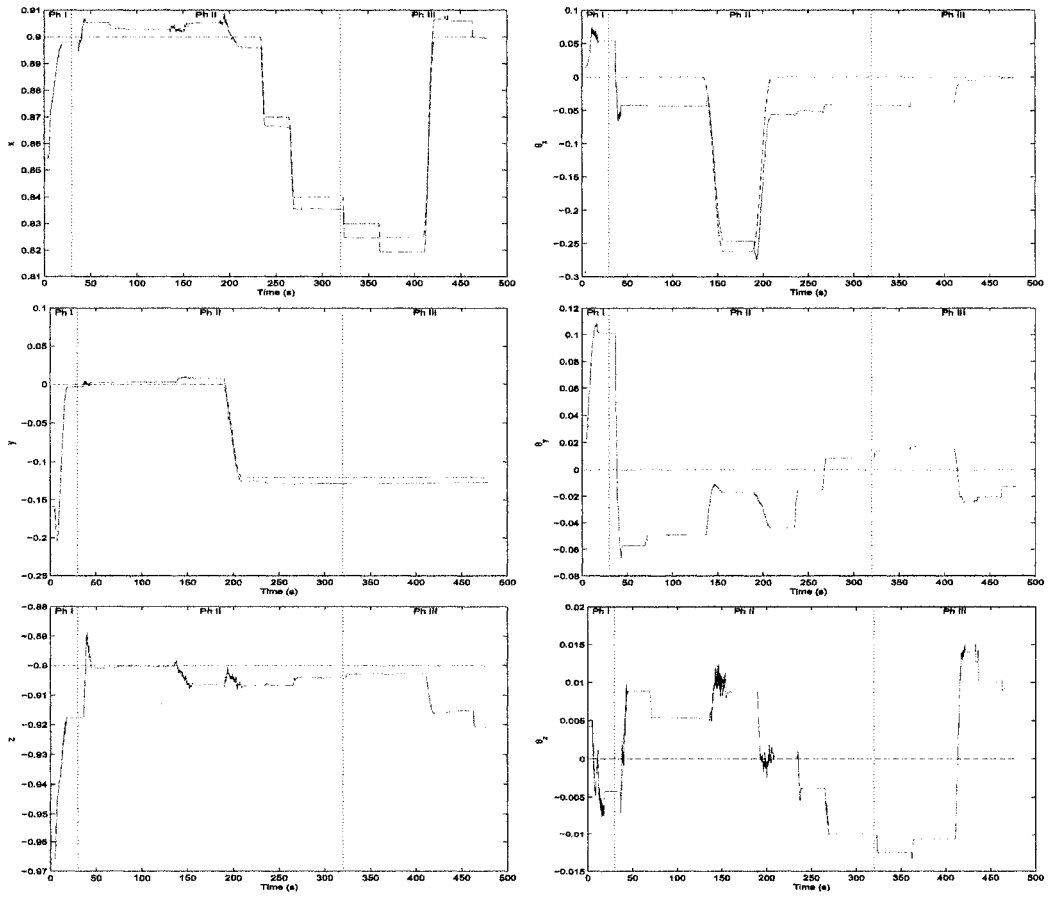


FIG. II.1 Positions/orientations de l'objet mesurées (-), désirées (--) et après commande par impédance (.)

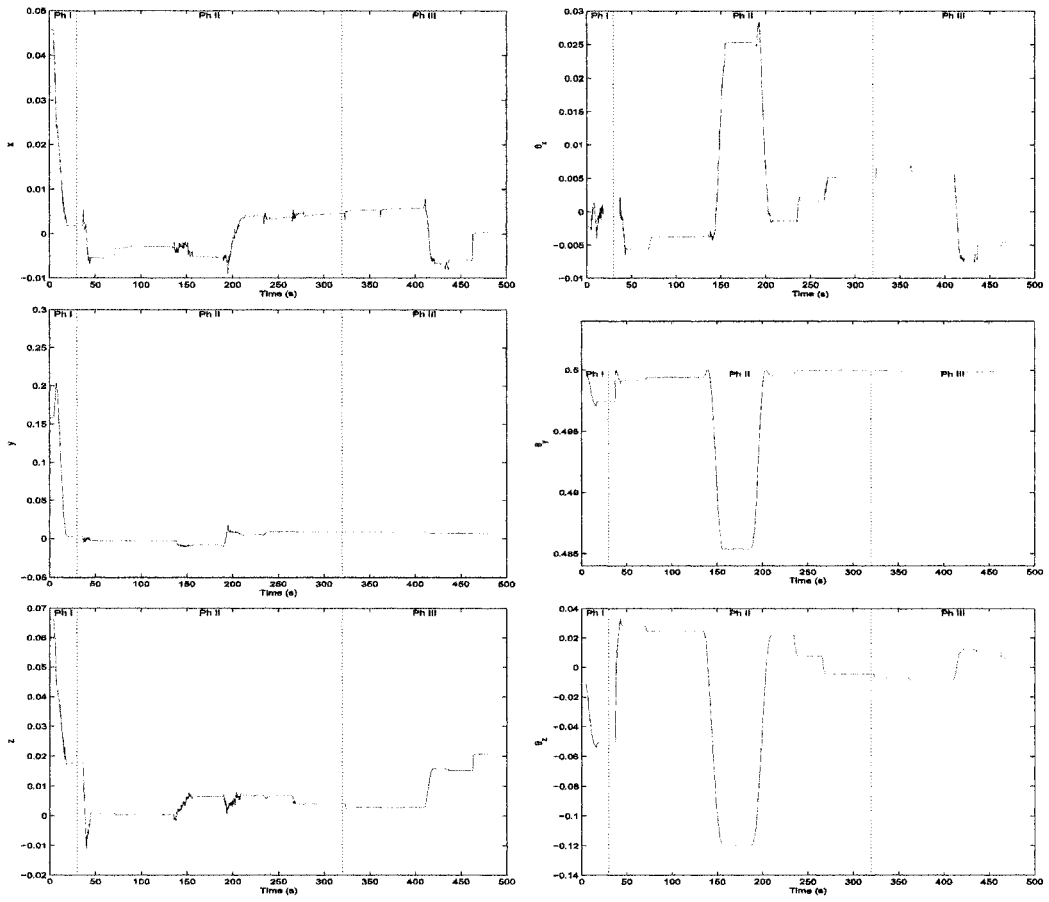


FIG. II.2 Erreurs en positions/orientations de l'objet

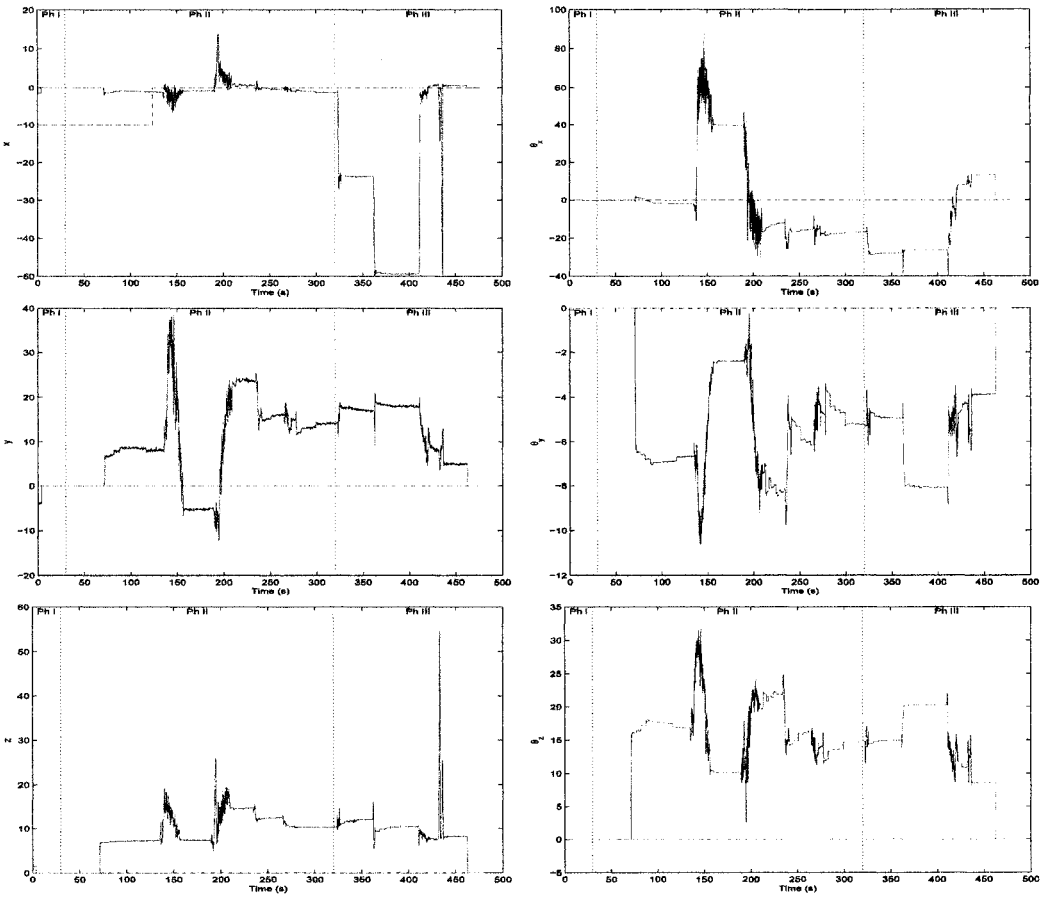


FIG. II.3 Forces/moments externes à l'objet mesurés (-) et désirés (--)

II.2 STM1

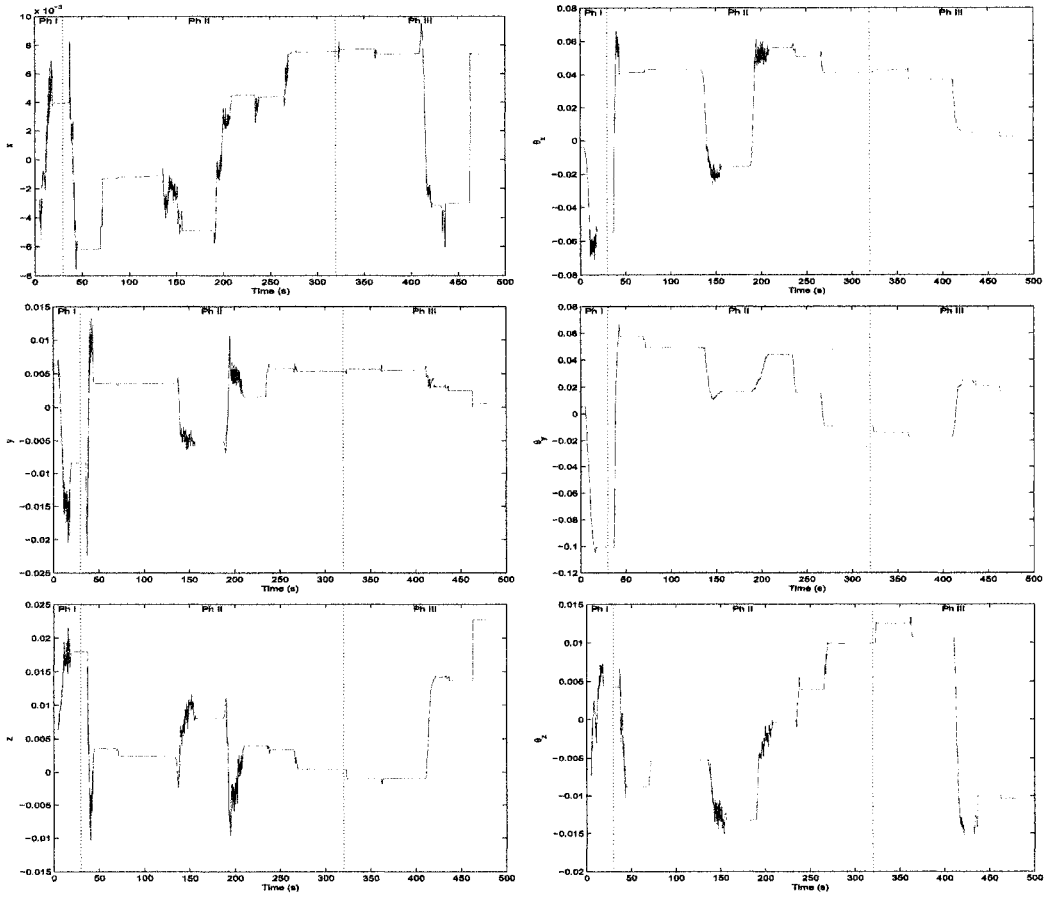


FIG. II.4 Erreurs en positions/orientations de STM1

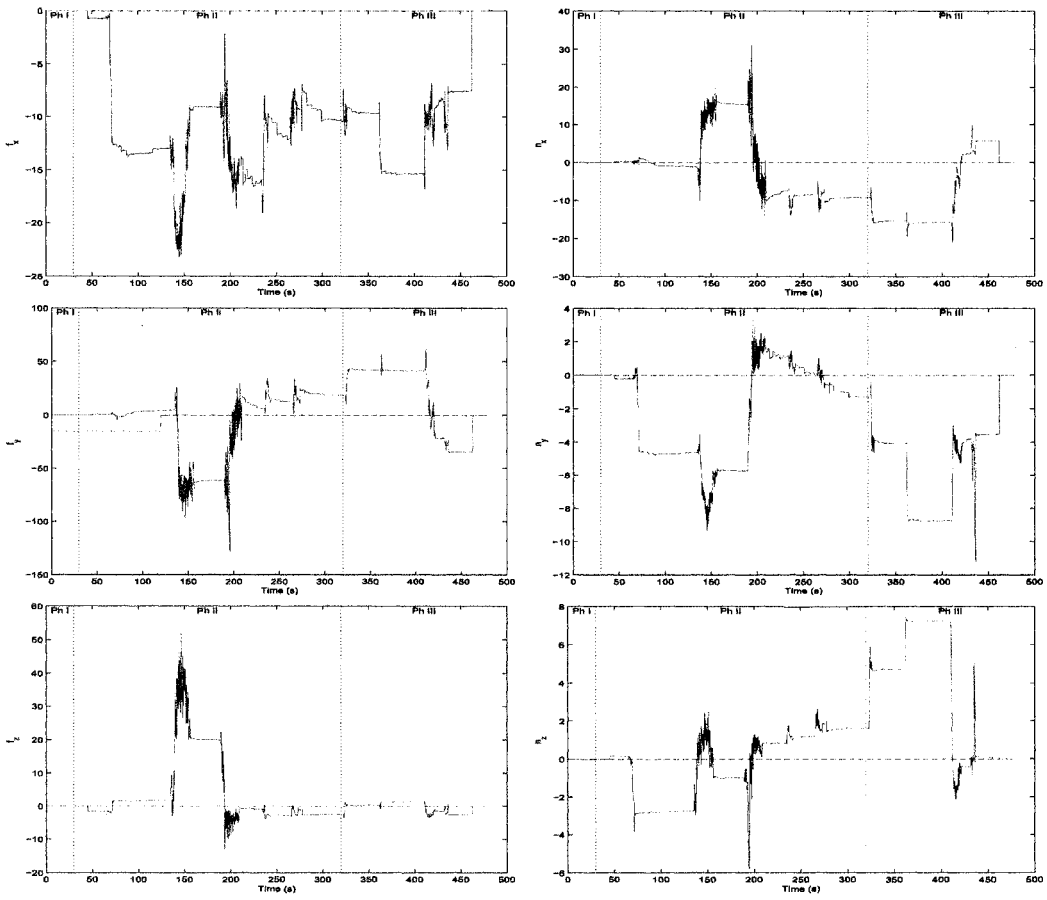


FIG. II.5 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM1

II.3 STM2

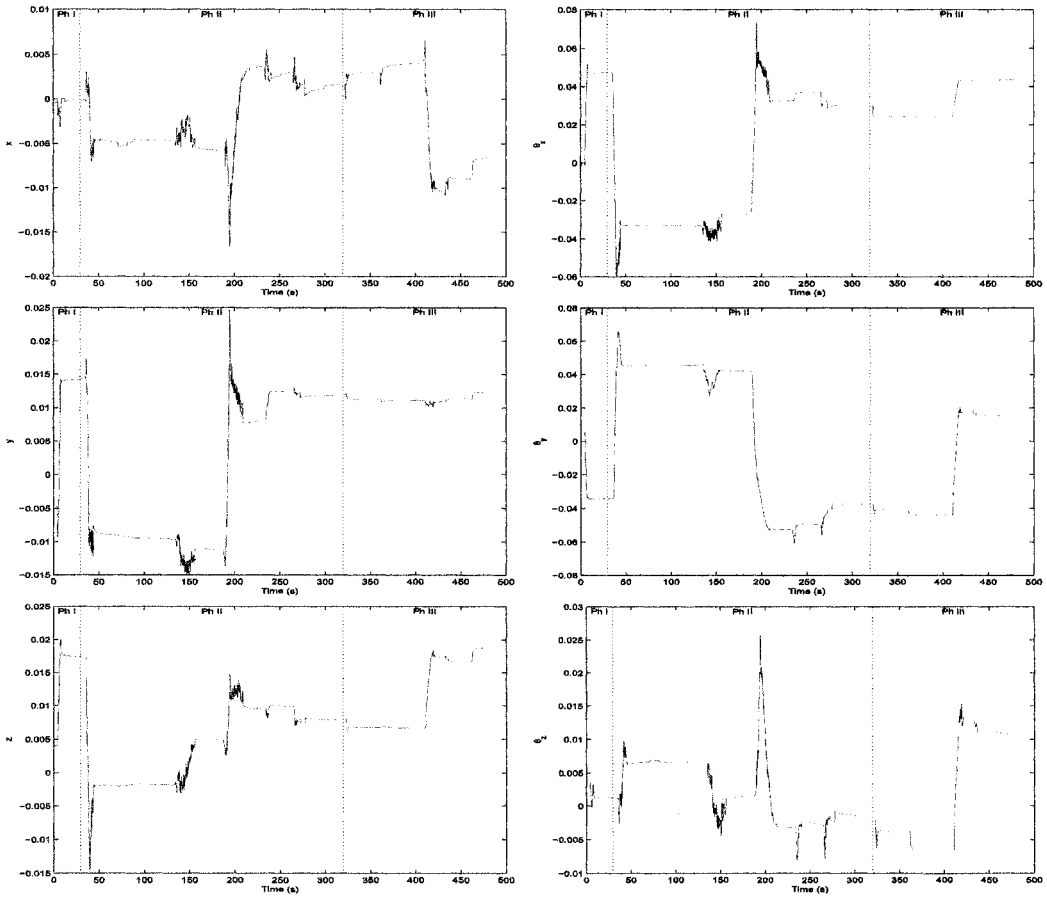


FIG. II.6 Erreurs en positions/orientations de STM2

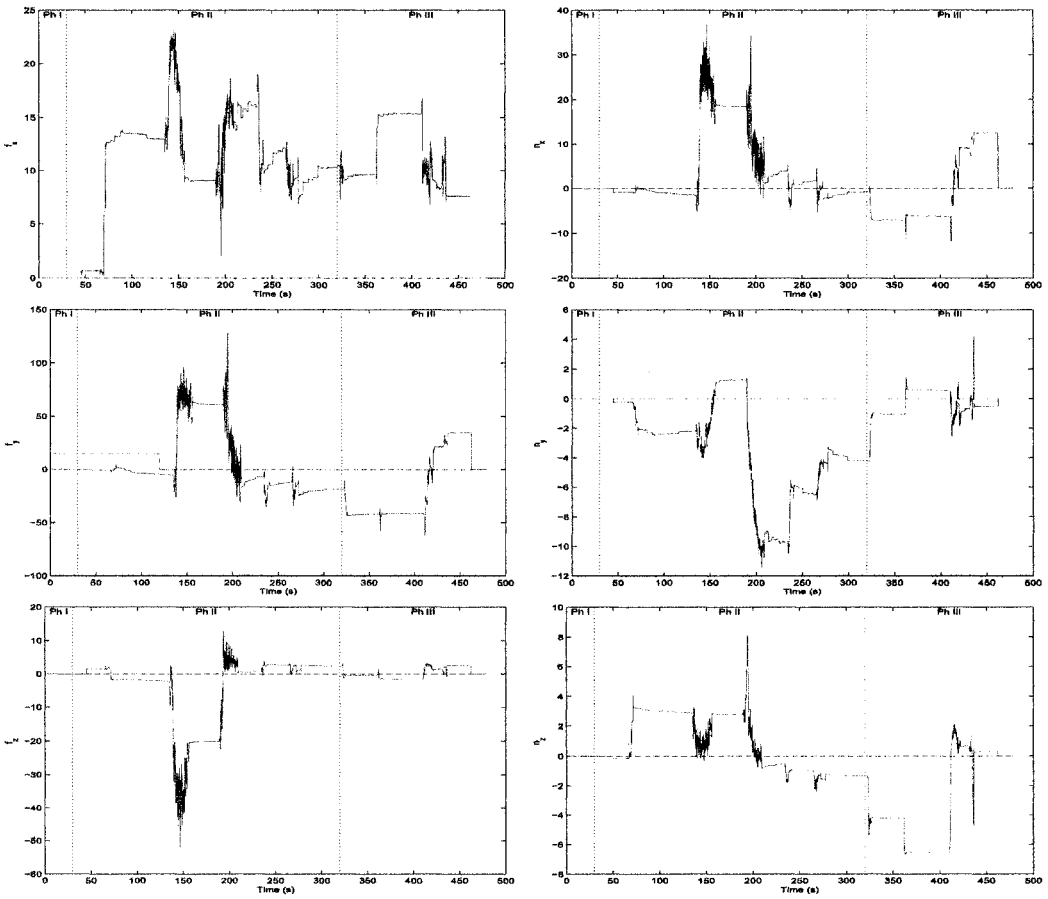


FIG. II.7 Forces/moments internes mesurés (-) et désirés (--) de STM2