الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

Filière : **Automatique**

Spécialité : **: Automatique et Informatique Industrielle**

Commande intelligente par modes glissants d'ordre supérieur d'un robot manipulateur

Réalisé par

MAGRI EL OUADJERI Maissa

Présente et soutenue publiquement le (06/07/2022)

Composition du Jury :

Président	M. KHELOUAT Samir	M.C.B	ENST
Promotrice	Mme FELLAG Ratiba	M.R.B	CDTA
Co-promoteur	M. REZOUG Amar	M.C.A	ENST
Examinateur	Mme BOULAAM Karima	M.C.B	ENST
Examinateur	M. NAIT SLIMANI Boukhalfa	M.A.A	ENST

Année universitaire 2021 –2022

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et à mon cher père qui n'ont jamais cessé de me supporter, me soutenir et m'encourager durant mes années d'études. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude et reconnaissance.

A mes frères, et ma sœur et ma famille qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A mon ami d'enfance Athmane, et ma chérie Hind pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de ce projet.

A tous ceux qui m'ont aidé - de près ou de loin - et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A tous mes cousines, mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Magri El ouadjeri & Maissa ✍

Remerciements

Ce mémoire présente le travail que j'ai effectué au sein de la division robotique du Centre de développement des technologies avancées -Baba Hassen - Alger

Au terme de ce travail,

je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice ***Mme FELLAG RATIBA*** *pour avoir accepté de m'encadrer qui était toujours là pour me supporter et m'apporter des précieux et sages conseils et être un support fort grâce à ses orientations riches d'expérience et de professionnalisme avec patience pendant toute la durée de réalisation de ce projet, non seulement cela mais aussi ses remarques qu'elle n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.*

Je tiens à remercier également mon ***Co-promoteur M. REZOUG AMAR*** *pour le temps qu'il a consacré et pour les précieuses informations qu'il m'a prodiguées avec intérêt et compréhension.*

J'adresse aussi mes remerciements aux membres des jurys ***M. KHELOUAT SAMIR , M. NAITSLIMANI BOUKHALFA et Mme. BOULAAM KARIMA*** *aux examinait et juger ce travail.*

Mes remerciements vont à tout le personnel que j'ai contacté durant mon stage au sein de CDTA, auprès desquelles j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont j'ai besoin.

Je ne laisserai pas cette occasion passer, sans remercier tous les enseignants et le personnel de l'ENST, et particulièrement ceux du département génie électronique et informatique industrielle pour leur aide et leurs précieux conseils et pour l'intérêt qu'ils portent à ma formation.

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.

Table des matières

Liste des figures **vi**

Liste des tableaux **ix**

Liste des abréviations **x**

Introduction générale **1**

I Description et Modélisation du robot manipulateur PUMA 560 **3**

I.1 Introduction 3

I.2 Généralités sur les robots 3

I.2.1 Historique 3

I.2.2 Constitution d'un robot manipulateur 4

I.2.3 Mouvements d'un robot manipulateur 6

I.3 Description du robot manipulateur PUMA 560 7

I.4 Modélisation du robot PUMA 560 8

I.4.1 Modélisation géométrique du robot PUMA 560 8

I.4.2 Modélisation cinématique du robot PUMA 560 11

I.4.3 Modélisation dynamique du robot PUMA 560 12

I.5 Conclusion 16

II La Commande par mode glissant du robot manipulateur PUMA 560 **17**

II.1 Introduction 17

II.2 Principes de la commande par mode glissant 17

II.2.1 Choix des surfaces de glissement 18

II.2.2 Conditions d'existence de convergence 19

II.2.3 La détermination de la loi de commande 20

II.2.4 Robustesse de la commande par mode de glissement 21

II.2.5 Phénomène de broutement (chattering) 22

II.2.6 Solutions pour réduire le phénomène de Broutement (chattering) 22

II.3 Application de la commande par mode glissant classique au robot PUMA 560 . . . 24
II.3.1 L'objectif du contrôle . . . 24
II.3.2 Synthèse de la loi de commande avec une surface de glissement classique . . . 25
II.3.3 Synthèse de la loi de la commande avec surface en PID . . . 28
II.4 Application de la commande par mode glissant avec couche limite pour le robot PUMA 560 . . . 31
II.4.1 Synthèse de la loi de commande MGCL . . . 31
II.4.2 Résultats de simulation . . . 32
II.5 Commande par modes glissants d'ordre supérieur . . . 34
II.5.1 Principe de fonctionnement . . . 34
II.5.2 Commande par mode glissant d'ordre deux . . . 34
II.5.3 Algorithme de commande par mode glissant d'ordre deux . . . 35
II.5.4 Application de la commande Super-Twisting sur le robot PUMA 560 . . . 38
II.6 Conclusion . . . 40

III Intelligence Artificielle et Commande par mode glissant 41
III.1 Introduction . . . 41
III.2 La logique floue . . . 41
III.2.1 Principes de la logique floue . . . 42
III.3 La commande par logique floue . . . 44
III.3.1 Étape de fuzzification . . . 44
III.3.2 Étape d'inférence . . . 45
III.3.3 Étape de défuzzification . . . 46
III.4 Commande par mode glissant-flou d'ordre un du robot PUMA 560 . . . 46
III.4.1 Synthèse de la commande hybride floue-glissante . . . 46
III.4.2 Résultats de Simulation de la commande glissante-floue . . . 50
III.5 Commande par mode glissant-Floue d'ordre deux du robot PUMA 560 51
III.5.1 Synthèse de la loi de commande MGSTF . . . 52
III.5.2 Résultats de simulation . . . 54
III.6 Conclusion . . . 56

IV Étude comparative et Simulation dynamique sur Simscape 57
IV.1 Introduction . . . 57
IV.2 Étude comparative des lois de commande développées . . . 57
IV.2.1 Comparaison des commandes par mode glissant d'ordre un . . . 58
IV.2.2 Comparaison des commandes par mode glissant et par mode glissant-flou d'ordre un . . . 61
IV.2.3 Comparaison des commandes par mode glissant-floue d'ordre supérieur . . . 64

IV.2.4 Comparaison en terme de temps de convergence t_s 64
IV.2.5 Comparaison en termes des racines des erreurs quadratiques moyennes 67
IV.3 Application de la commande Mode-glissant-floue d'ordre supérieur dans SimScape Multibody 68
IV.3.1 La description du Simscape Multibody 68
IV.3.2 Application de la commande sur le Modèle 3D du robot PUMA 560 69
IV.3.3 Les résultats de simulation avec Simscape multibody 69
IV.4 Conclusion 71

Conclusion générale et perspectives **72**

Bibliographie **74**

Annexe A Annexe A **77**
A.1 Modélisation du robot manipulateur PUMA 560 77
A.1.1 Modèle géométrique direct du robot PUMA 560 77
A.1.2 Modèle dynamique du robot PUMA 560 78
A.2 La condition de recouvrement 80

Liste des figures

I.1 L'évolution des robots industriels [1] 5
I.2 Symbole d'une articulation rotoïde 5
I.3 Symbole d'une articulation prismatique 5
I.4 Robot manipulateur à chaîne cinématique ouverte simple [3] 6
I.5 Le robot PUMA 560 7
I.6 Le placement des repères du robot PUMA 560 [8] 9

II.1 Le phénomène de broutement 22
II.2 Schéma expérimental de la commande MG-classique 26
II.3 La trajectoire de position par la commande MG-classique 27
II.4 Erreur de position par la commande MG-classique 27
II.5 Le couple d'entrée par la commande MG-classique 28
II.6 Schéma expérimental de la commande MG-PID 29
II.7 La trajectoire de position par la commande MG-PID 30
II.8 Erreur de position par la commande MG-PID 30
II.9 Le couple d'entrée par la commande MG-PID 30
II.10 Le schéma expérimental de la commande MGCL 32
II.11 La trajectoire de position par la commande MGCL-classique 33
II.12 La trajectoire de position par la commande MGCL-PID 33
II.13 Erreur de position par la commande MGCL-classique 33
II.14 Erreur de position par la commande MGCL-PID 33
II.15 Le couple d'entrée par MGCL-classique 33
II.16 Le couple d'entrée par la commande MGCL-PID 33
II.17 Trajectoire d'un mode glissant du second ordre[27]. 35
II.18 Trajectoire du plan de phase de l'algorithme de Twisting [29] 36
II.19 Trajectoire du plan de phase de l'algorithme de super-twisting [29] . . . 37
II.20 Le schéma expérimental de la commande MGST 39
II.21 la trajectoire de position par la commande MGST 39
II.22 Erreur de position par la commande MGST 39
II.23 Le couple d'entrée par la commande MGST 39

III.1 Les différentes formes des fonctions d'appartenances 43
III.2 Configuration générale d'une commande floue 44
III.3 Fonctions d'appartenance triangulaire 45
III.4 La configuration de la commande par mode glissant-floue d'ordre un . . 47
III.5 la répartition des fonctions d'appartenance des variables d'entrées $(e, \dot{e})$ -sorties (K_{pf}, K_{if}, K_{df}) 47
III.6 la répartition des fonctions d'appartenance des variables d'entrées $(s, \dot{s})$-sorties (u_f) 50
III.7 Poursuite de trajectoire par la commande MG-F 51
III.8 Erreurs de position par la commande MG-F 51
III.9 Couples des articulations du robot PUMA 560 par la commande MG-F 51
III.10 Schéma fonctionnel de la commande mode glissant super-twisting floue (MGSTF) 52
III.11 La répartition des fonctions d'appartenance des variables d'entrées-sorties pour la variable $\hat{\lambda}$ 54
III.12 La répartition des fonctions d'appartenance des variables d'entrées $(s, \dot{s})$-sorties $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 54
III.13 Trajectoires de position par la commande MGSTF 56
III.14 Erreurs de position par la commande MGSTF 56
III.15 Couples des articulations du robot PUMA 560 par la commande MGSTF 56

IV.1 Comparaison des résultats de suivi de trajectoire par mode glissant d'ordre un 59
IV.2 Comparaison les commandes mode glissant d'ordre un par type de surface de glissement 60
IV.3 La trajectoire de position et l'erreur de position par la commande MG-PID et la commande MGF-PID pour les trois articulation 62
IV.4 Comparaison des deux commandes par mode glissant d'ordre un avec la commande floue et sans floue sur les trois axes 63
IV.5 La trajectoire de position et l'erreur de position par les commandes (MGF-PID),(MGST),(MGSTF) 65
IV.6 Comparaison des trois commandes par mode glissant : d'ordre un flou et la commande par mode glissant d'ordre deux (sans flou et avec flou) sur les trois axes 66
IV.7 L'animation 3D du robot PUMA 560 sur Simscape 68
IV.8 Modèle Simscape/Multibody du robot PUMA 560 69
IV.9 Allures des positions sur trois axes avec la commande MGSTF du modèle physique du robot PUMA 560 70
IV.10 Allures des erreurs de positions sur trois axes avec la commande MGSTF du modèle physique du robot PUMA 560 70

IV.11Allures des couples de commande de trois axes en mode suivi de trajectoire avec la commande MGSTF du modèle physique du robot PUMA 560 . 71

Liste des tableaux

I.1 Les caractéristiques du robot manipulateur PUMA 560 [5] 7
I.2 Les paramètres des moteurs du robot PUMA 560 [6] 8
I.3 Les paramètres DH du robot PUMA 560 [9] 9

III.1 Les règles floues du K_{pf} 48
III.2 Les règles floues du K_{if} 48
III.3 Les règles floues du K_{df} 48
III.4 Les règles floues de la commande u_f 50
III.5 Les règles floues du coefficient $\hat{\lambda}$ 55
III.6 Les règles floues du coefficient $\hat{\alpha}$ 55
III.7 Les règles floues du coefficient $\hat{\beta}$ 55

IV.1 Tableau des temps convergence des erreurs de position vers zéro 66
IV.2 La racine de l'erreur quadratique moyenne 67

A.1 Constante inertielle ($Kg.m^2$) 80
A.2 Constante gravitationnelle ($N.m$) 80

Liste des abréviations

R	Articulation rotoïde
P	Articulation prismatique
C	Corps
n	Nombre des articulations et nombre degrés de liberté
X	coordonnées opérationnelles
W	Vitesse angulaire
V	Vitesse linéaire
$j(q)$	Matrice jacobienne
q	Vecteur des positions articulaires
$\dot{q}$	Vecteur des vitesses articulaires
$\ddot{q}$	Vecteur des accélérations articulaires
$M(q)$	Matrice d'inertie
$B(q)$	Matrice des forces Coriolis
$C(q)$	Matrice des forces centrifuges
$G(q)$	Vecteur des forces de gravité
$F(\dot{q})$	Vecteur de frottement
τ	Vecteur des couples
F_{ext}	Vecteur des efforts extérieurs
L	Lagrangien
T	L'énergie cinétique
U	L'énergie potentielle
P_{ci}	Vecteur des coordonnées du centre de gravité du corps
u	Vecteur de l'entrée de commande
$\dot{x}$	Vecteur d'état du système
s	Surface de glissement
e	Vecteur d'erreur de position
x_d	État désiré
V	Fonction de Lyapunov
u_{eq}	La commande équivalente
u_{dis}	La commande discontinue
$d(x,t)$	Vecteur de perturbation

q_d	Etat désiré
λ	Constante positive
τ_{eq}	La commande équivalente applique du robot
τ_{dis}	La commande discontinue applique du robot
K_p	Gain proportionnel
K_i	Gain intégrateur
K_d	Gain de dérivé
K	Constante positive
$\tau_{co,}$	La commande continue
r	Degré relatif
u_{st}	La commande super twisting
α	Constante positive de la commande super twisting
β	Constante positive de la commande super twisting
$\hat{\lambda}$	Parametre adapté par logique floue
$\hat{\beta}$	Paramètre adapté par logique floue de la commande super twisting
$\hat{\alpha}$	Paramètre adapté par logique floue de la commande super twisting
$\hat{K_p}$	Gain proportionnel adapté par logique floue
$\hat{K_i}$	Gain intégrateur adapté par logique floue
$\hat{K_d}$	Gain dérivé adapté par logique floue
τ_f	La commande discontinue par logique floue
s_{PID-F}	Surface de glissement floue
τ_{eqf}	La commande équivalente floue
τ_{MGF}	La commande mode glissant floue
τ_{MGSTF}	La commande mode glissant super twisting floue
MGD	Le modèle géométrique directe
MGI	Le modèle géométrique inverse
MCD	Le modèle cinématique direct
MCI	Le modèle cinématique inverse
MDD	Le modèle dynamique direct
MGI	Le modèle dynamique inverse
PID	Proportionnel intégrateur dérivé
$MG-lassique$	Mode glissant classique
$MGCL$	Mode glissant avec couche limite
$MGCL-Classique$	Mode glissant avec couche limite classique
$MGCL-PID$	Mode glissant avec couche limite PID
$MGST$	Mode glissant super twisting
MGF	Mode glissant floue
$MGSTF$	Mode glissant super twisting floue
$REQM$	Racines des erreurs quadratiques moyennes

Introduction Générale

L'utilisation des manipulateurs robotiques a eu un effet incommensurable sur l'industrie et la fabrication dans le monde entier. Les robots peuvent effectuer efficacement et économiquement des tâches répétitives et fastidieuses que les travailleurs humains sont incapables d'effectuer. D'autres tâches où l'utilisation des robots est particulièrement bénéfique comprennent celles qui sont effectuées dans des environnements dangereux. Celles-ci incluent généralement le soudage et la manipulation ou l'enlèvement de matériaux dangereux. Actuellement, grâce aux avancées technologiques et à l'intégration de capteurs de force et de couple, les robots industriels sont utilisés dans une infinité d'applications, dans l'industrie, la médecine et le domaine militaire. Ces améliorations rendent les systèmes robotiques plus flexibles et leur permettent d'effectuer une grande variété de tâches.

Pour profiter de cette polyvalence, le contrôleur robotique doit être capable de fonctionner avec précision à des vitesses élevées tout en étant insensible aux variations des perturbations externes et aux incertitudes. Il est très difficile d'obtenir toutes ces qualités sans introduire des calculs complexes dans la loi de commande. En ce sens, plusieurs techniques sont proposées pour simplifier la conception des systèmes de contrôle. Parmi ceux qui allient la propriété de robustesse à la convergence rapide avec la haute précision, on cite la commande par mode glissant.

La commande mode glissant (MG) est une technique de commande non linéaire qui est capable de rendre un système de contrôle très robuste vis-à-vis des variations des incertitudes paramétriques et des forces externes. Le principe de la commande par modes glissants est d'exiger les trajectoires du système à atteindre une surface de glissement. Elle se caractérise par le fait que la loi de commande change de manière discontinue. L'inconvénient de cette technique est le phénomène de broutement (chattering en Anglais) à cause du caractère discontinu de la commande qui engendre des oscillations indésirables autour de la surface de glissement.

Nous avons proposé différentes techniques pour pallier à cet inconvénient dont l'une consiste à remplacer la fonction discontinue qui est le siège de ce phénomène par une fonction continue au voisinage de la surface de glissement ou par une commande floue, d'autres techniques consistent à utiliser les modes glissants d'ordre supérieur qui sont

caractérisés par des actions discontinues sur les dérivées d'ordre supérieur de l'entrée du système.

L'objectif de notre travail est d'analyser et de résoudre des problèmes de commande pour réaliser la tâche de suivi de trajectoire d'un robot manipulateur. Dans ce cadre nous avons étudié la commande intelligente par mode glissement d'ordre supérieur afin de l'appliquer à un robot manipulateur de typa PUMA 560 pour l'amélioration des performances du système et assurer la robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations tout e éliminant le phénomène de broutement (chattering).

Pour bien traiter le problème, ce mémoire est structuré autour de quatre chapitres dont le contenu est décrit de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons donner quelques notions de base sur les robots manipulateurs puis on va présenter la description du robot manipulateur étudié, le robot PUMA 560. Ce dernier est caractérisé par six degrés de liberté. On présentera l'obtention du modèle géométrique, le modèle cinématique, ainsi que le modèle dynamique de ce robot.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les aspects théoriques de la commande par modes de glissement d'ordre un et d'ordre supérieur puis l'application de ces commandes sur le modèle dynamique du robot PUMA 560 en mode de suivi de trajectoire. L'objectif est la réduction de phénomène de broutement et l'amélioration des performances du système dynamique.

Le troisième chapitre est consacré à l'intégration d'une technique d'intelligence artificielle à savoir la logique floue et son hybridation avec la commande par mode glissant. Nous présentons deux techniques de commandes glissantes-floues pour le robot PUMA 560. La première technique est une commande par mode glissant d'ordre un-floue qui est basée sur le remplacement de la commande discontinue par un contrôleur flou et nous avons aussi fait l'adaptation des gains de la surface de glissement par la logique floue. La seconde technique est une commande par mode glissant d'ordre deux avec deux contrôleurs flous pour l'adaptation des paramètres de la loi de commande. Nous utilisons ces deux techniques pour réduire le phénomène de broutement (chattering) et pour avoir une meilleure précision.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude comparative entre les différentes lois de commandes par mode glissant développées dans le cadre de ce travail. On va analyser les résultats de la simulation des toutes les commandes appliquées au robot PUMA 560 ainsi qu'une simulation dynamique sur Simscape de MATLAB/Simulink.

En fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre I

Description et Modélisation du robot manipulateur PUMA 560

I.1 Introduction

Les robots industriels de type série sont de plus en plus utilisés dans les domaines aéronautiques et automobiles pour des opérations de pré-usinage, perçage et pour des opérations industrielles simples comme l'assemblage, la manipulation et le soudage de pièces [1]. Le robot industriel se compose d'un robot manipulateur, d'une alimentation électrique et d'un contrôleur. Selon le type de tâche et le champ d'application, le robot aura une architecture mécanique et un système de commande différent. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la commande en position du robot PUMA 560, ainsi, dans ce premier chapitre, nous introduisons quelques généralités sur les robots puis nous présentons le robot manipulateur, le PUMA 560. Nous développons, par la suite, les équations mathématiques régissant le mouvement de ce robot à travers l'étude des modèles géométriques, cinématiques et dynamiques.

I.2 Généralités sur les robots

I.2.1 Historique

L'automatisation industrielle se caractérise par la demande des robots industriels.En effet, depuis leur création, ces robots sont développés dans l'optique d'assister les humains et pour effectuer des tâches répétitives, pénibles et parfois dangereuses. Le premier robot industriel a été créé en 1959, appelé Unimate par George Devol et Joe Engelberger [1]. Il est en fait un descendant direct des télémanipulateurs développés pour les besoins du nucléaire. Il est vendu à partir de 1961 par la société américaine Unimation.

Dans les années 1970, KUKA a développé le robot Famulus, le premier robot électromécanique à six axes. Depuis, l'activité dans le domaine des robots industriels n'a

cessé de se développer de manière significative. Nous pouvons citer les faits marquants suivants [1] :

- Hitachi a développé le premier robot en 1970. Ce fut le premier robot à intégrer des capteurs de vision dynamique pour détecter des objets en mouvement.
- Le robot T3 a été créé par Cincinnati Milacron Corporation en 1974, c'était le premier robot contrôlé par microprocesseur.
- ASEA a développé le premier robot ARB 6 avec un microprocesseur Intel 8 bits en 1974.
- General Motors a été fusionné avec Unimation/Vic Schienman en 1970. Ils sont créés le robot PUMA 560 pour assembler les pièces plus légères.
- Hiroshi Makino de l'Université de Yamanashi a développé le robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) en 1978.
- Haruiko Asada et Takeo Kanade ont proposé une méthode de conception des mécanismes de transmission du bras robotique, le bras à entraînement direct en 1981. Ce mécanisme permet aux robots de se déplacer avec précision à des vitesses élevées.
- Comau a introduit en Italie le WiTP (Wireless Technology Necklace) en 2006, une unité de commande et programmation des robots sans fil.
- Dans la même année, KUKA en Allemagne a développé un robot avec une structure extérieure en aluminium pour réduire son poids et réaliser des économies d'énergie.

I.2.2 Constitution d'un robot manipulateur

Un robot manipulateur est constitué par l'assemblage de corps solides articulés entre eux. Les articulations peuvent être motorisées, qui sont représentées par des liaisons actives. Il s'agira généralement des articulations rotoïdes ou prismatiques. Ou par des articulations non motorisées, qui sont représentées par des articulations passives. Un mouvement du robot est obtenu par les liaisons actives [2].

I.2.2.1 Articulation rotoïde

Il s'agit d'une articulation de type pivot, réduisant le mouvement entre deux liaisons à une rotation autour d'un axe commun. L'emplacement relatif entre les deux liaisons est donné par l'angle autour de cet axe. L'articulation rotoïde, notée $\boldsymbol{R}$, est illustrée par les symboles représentés sur la Figure I.2 [2].

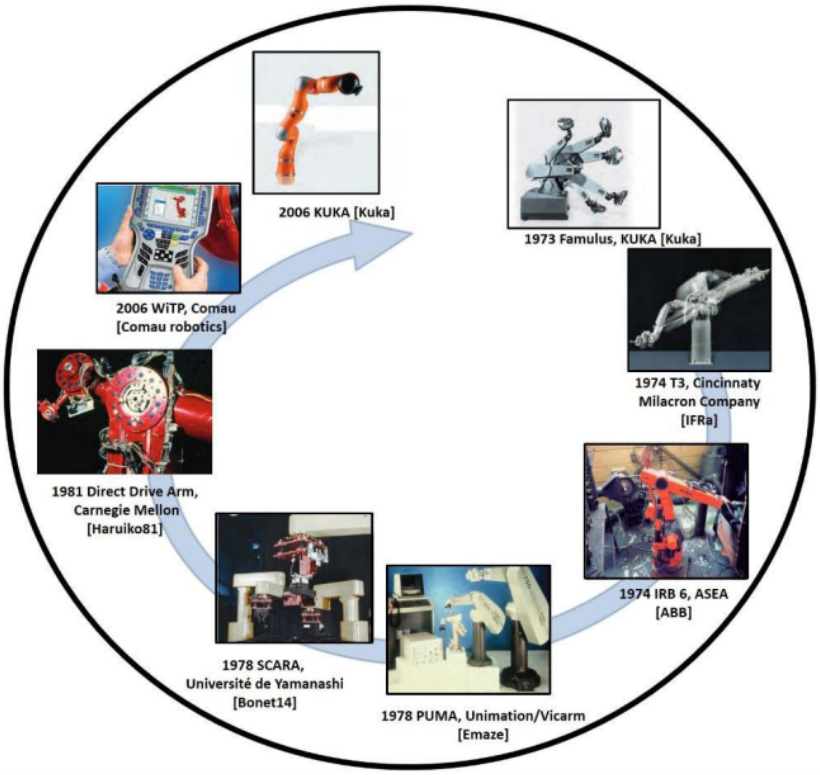


FIGURE I.1 : L'évolution des robots industriels [1]

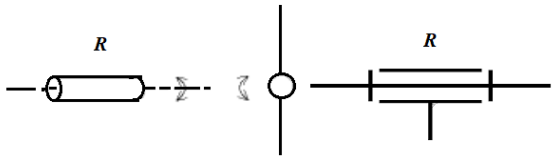


FIGURE I.2 : Symbole d'une articulation rotoïde

I.2.2.2 Articulation prismatique

Il s'agit d'une articulation de type glissière, réduisant le mouvement entre deux liaisons à une translation selon un axe commun. L'emplacement relatif entre les deux liaisons est déterminé par la distance le long de cet axe. L'articulation prismatique, notée ***P***, est représentée par les symboles sur la Figure I.3 [2] :

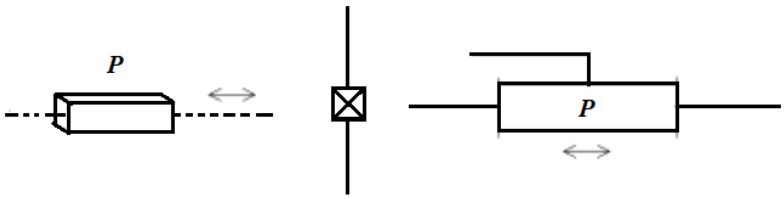


FIGURE I.3 : Symbole d'une articulation prismatique

I.2.3 Mouvements d'un robot manipulateur

Un bras manipulateur est une chaîne cinématique ouverte simple et constituée de n corps solides notés $[C_0, \ldots, C_n]$ articulés entre eux suivant une structure de chaine par des liaisons (articulations). Le premier corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_n porte l'organe terminal. L'articulation (liaison) i connecte le corps C_i au corps C_{i+1}. Cette articulation est de nature rotoïde $\boldsymbol{R}$ ou prismatique $\boldsymbol{P}$ [3].

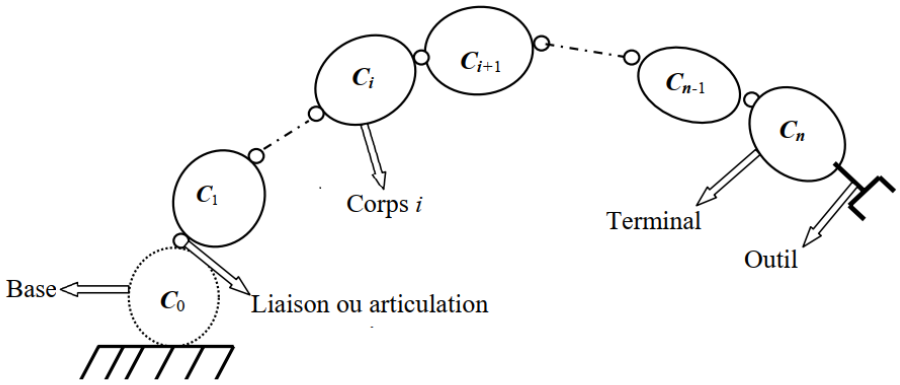


FIGURE I.4 : Robot manipulateur à chaîne cinématique ouverte simple [3]

I.2.3.1 Degrés de liberté

Les degrés de liberté (*ddl*) d'un robot manipulateur sont le nombre des coordonnées indépendantes nécessaires pour une description complète permettant de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement [3]. Un robot manipulateur est caractérisé par plusieurs *ddl*.

I.2.3.2 Espace articulaire

L'espace articulaire (espace de configuration) est l'espace qui représente l'emplacement de toutes les liaisons d'un robot. Nous utilisons les coordonnées généralisées articulaires, $(q \in R^n)$ comme coordonnées de cet espace. Sa dimension n est égale au nombre des articulations indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique [2]. On considérera qu'un robot à n degrés de liberté $(n - ddl)$ possède n articulations actionnées.

I.2.3.3 Espace opérationnel

L'espace opérationnel (espace de tâche) est l'espace qui représente la position et l'orientation de l'organe terminal. La solution la plus simple est d'utiliser des coordonnées cartésiennes $(X \in R_m)$ comme coordonnées de cet espace. Ainsi, la valeur m constitue le nombre maximal de degrés de liberté que peut avoir un dispositif terminal, égal au nombre de paramètres indépendants nécessaires pour décrire la position du dispositif terminal dans l'espace cartésien $m \leq n$ [2].

I.3 Description du robot manipulateur PUMA 560

Les robots du type PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) sont les plus populaires dans les domaines de recherche et les robots d'assemblage les plus utilisés dans l'industrie [4]. Le robot manipulateur PUMA 560 est un chaine cinématique ouverte simple de type série, illustré sur la Figure I.5. Il possède six axes de rotation actifs $(6-ddl)$. Chacun de ses axes est commandé par un servomoteur à courant continu permettant ainsi de réaliser différents mouvements de manipulation. Le robot PUMA 560 possède aussi des réducteurs pour contrôler le rapport de vitesse et le couple entre l'axe d'entrée et l'axe de sortie du mécanisme [4].

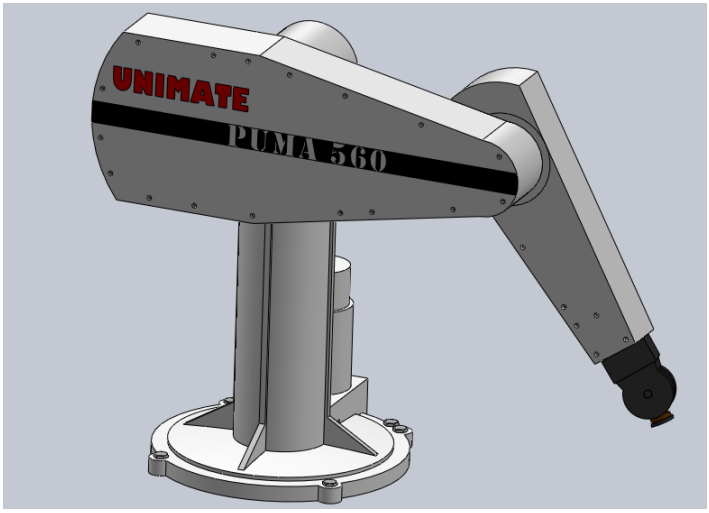


FIGURE I.5 : Le robot PUMA 560

Les caractéristiques du robot PUMA 560 utilisées sont rapportées dans le Tableau (I.1) et les paramètres des couples de moteurs maximales et minimales sont donnés dans le Tableau (I.2) [5]. Ces contraintes seront prises en compte lors de l'élaboration des lois de commande par la suite.

Axes	Masse (Kg)	Plage de variation (deg)	Corps	Longueur(m)
Axe 1	2.24	$-160 \leq q_1 \leq 160$	1er corps	0
Axe 2	17.40	$-245 \leq q_2 \leq 45$	$2^{éme}$ corps	0.418
Axe 3	4.80	$-45 \leq q_3 \leq 225$	$3^{éme}$ corps	0.0203
Axe 4	0.82	$-110 \leq q_4 \leq 170$	$4^{éme}$ corps	0.43307
Axe 5	0.34	$-100 \leq q_5 \leq 100$	$5^{éme}$ corps	0
Axe 6	0.09	$-266 \leq q_6 \leq 266$	$6^{éme}$ corps	0.05625

TABLEAU I.1 : Les caractéristiques du robot manipulateur PUMA 560 [5]

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 6
Le couple maximal (N.m)	140	180	140	80	80	40
Le couple minimal (N.m)	-140	-180	-140	-80	-80	-40

TABLEAU I.2 : Les paramètres des moteurs du robot PUMA 560 [6]

I.4 Modélisation du robot PUMA 560

I.4.1 Modélisation géométrique du robot PUMA 560

Le modèle géométrique d'un robot est le lien fonctionnel entre les coordonnées opérationnelles caractérisant la position et l'orientation du robot et les coordonnées généralisées définissant la configuration du robot. On distingue deux modèles géométriques :

- **La modèle géométrique directe (MGD)** : Il permet de décrire la position et l'orientation de l'effecteur connaissant les valeurs des variables articulaires (q_i) «Modèle d'information».
- **Le modèle géométrique inverse (MGI)** : Il permet de déterminer les valeurs des variables articulaires connaissant la position et l'orientation de l'effecteur «Modèle de commande».

I.4.1.1 Le modèle géométrique direct du robot PUMA 560

Le modèle géométrique direct (MGD) du robot PUMA 560 permet de déterminer la position du repère effecteur X en fonction des variables articulaires q tel que :

$$X = F(q) \tag{I.1}$$

Avec : $X = [P_x,\ P_y,\ P_z,\ \rho,\ \theta,\ \phi]^T$: Vecteur des positions et des orientations de l'effecteur et $q = [q_1,\ q_2,\ q_3,\ q_4,\ q_5,\ q_6]^T$: Vecteur des variables articulaires.

Pour obtenir le modèle géométrique direct, il est d'abord nécessaire d'attacher les différents repères aux axes du robot selon la méthode de DENAVIT-HARTENBERG [2]. Ensuite de déterminer la matrice de transformation homogène définissant le repère R_i and R_{i-1} avec i le nombre d'articulation est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = \begin{pmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 & a_j \\ \cos\alpha_j \sin\theta_j & \cos\alpha_j \sin\theta_j & -\sin\alpha_j & -d_j \sin\alpha_j \\ \sin\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & \cos\alpha_j & d_j \cos\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{I.2}$$

Avec :

- a_j : distance entre les axes z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1} ;
- α_j : angle entre les axes z_{j-1} et z_j correspondant à une rotation autour de x_{j-1} ;

- θ_j : angle entre les axes x_{j-1} et x_j correspondant à une rotation autour de z_j ;

- d_j : distance entre les axes x_{j-1} et x_j le long de z_j ;

La figure I.6 présente les différents repères utilisés dans la description géométrique du robot PUMA 560. Les paramètres DH définissant le passage du repère R_i et R_{i-1} sont exprimés dans le tableau I.3 [7].

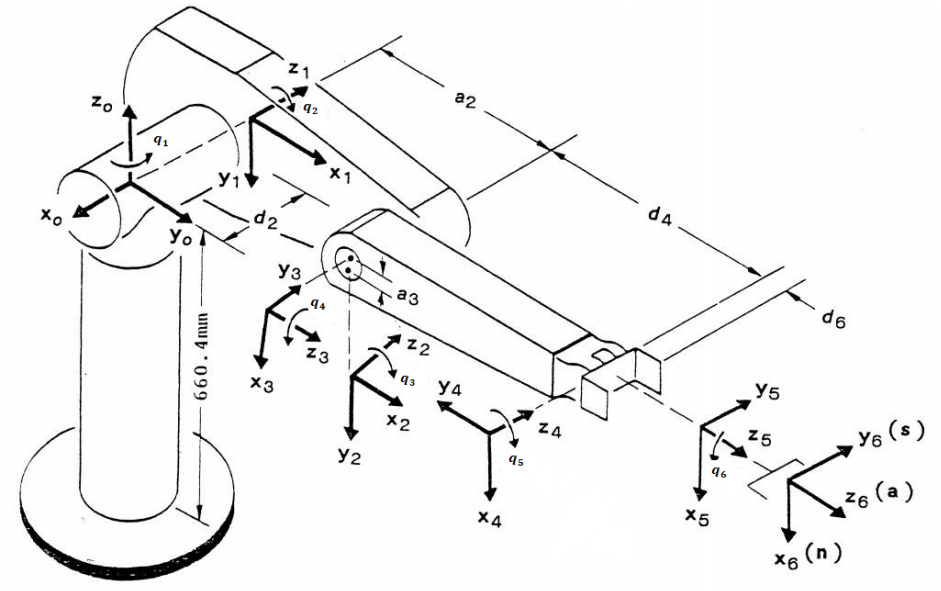


FIGURE I.6 : Le placement des repères du robot PUMA 560 [8]

Axe i	θ_j	α_j(rad)	a_j(m)	d_j(m)
1	q_1	$-\frac{\pi}{2}$	0	0
2	q_2	0	0.4318	0.14909
3	q_3	$\frac{\pi}{2}$	0.0203	0
4	q_4	$-\frac{\pi}{2}$	0	0.43307
5	q_5	$\frac{\pi}{2}$	0	0
6	q_6	0	0	0.05625

TABLEAU I.3 : Les paramètres DH du robot PUMA 560 [9]

La matrice de passage de l'organe terminal à la base (fixe) est donnée par le produit des matrices élémentaires :

$$ {}^0_6T = {}^0_1T\,{}^1_2T\,{}^2_3T\,{}^3_4T\,{}^4_5T\,{}^5_6T \tag{I.3} $$

$$ {}^0_6T = \begin{bmatrix} {}^0_6R & {}^0_6P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{I.4} $$

Où ${}^0_6R$ est une matrice de rotation (3×3) sous forme :

$$ {}^0_6R = \begin{bmatrix} N_x & B_x & T_x \\ N_y & B_y & T_y \\ N_z & B_z & T_z \end{bmatrix} \tag{I.5} $$

ET ${}^0_6T$ est une matrice de translation (3×1) sous forme :

$$ {}^0_6P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \tag{I.6} $$

Les détails des matrices dans les équations (I.5) et (I.6) sont données dans l'annexe A.

I.4.1.2 Le modèle géométrique inverse du robot PUMA 560

Le modèle géométrique inverse (MGI) d'un robot manipulateur est destiné à calculer une position articulaire à partir d'une position opérationnelle. Ce modèle peut être obtenue par la méthode de PAUL [10]. Cette méthode est également appelée méthode générale d'inversion qui utilise le MGD pour le calcul du MGI [11] comme suit :

Soit le robot PUMA 560 décrit par la matrice de transformation homogène de l'équation (I.3), et la matrice U_0 définissant la situation désirée telle que :

$$ U_0 = \begin{pmatrix} N_x & B_x & T_x & P_x \\ N_y & B_y & T_y & P_y \\ N_z & B_z & T_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{I.7} $$

Le MGI est obtenu en résolvant l'équation matricielle suivante :

$$ U_0 = {}^0_1T(q_1){}^1_2T(q_2){}^2_3T(q_3){}^3_4T(q_4){}^4_5T(q_5){}^5_6T(q_6) \tag{I.8} $$

Cette méthode permet la détermination de q_1 puis q_2 est ainsi de suite jusqu'à l'articulation q_6. Il s'agit de déplacer l'une après l'autre chacune des variables articulaires $(q_1, q_2 \dots q_6)$ dans le membre gauche de l'équation [11]. Dans le cas du robot PUMA 560, la résolution est donnée dans l'équation (I.9) :

$$ \begin{aligned} U_0 &= {}^0_1T{}^1_2T{}^2_3T{}^3_4T{}^4_5T{}^5_6T \\ {}^1_0TU_0 &= T^1_2T^2_3T^3_4T^4_5T^5_6T \\ {}^2_1TU_1 &= T^2_3T^3_4T^4_5T^5_6T \\ {}^3_2TU_2 &= T^3_4T^4_5T^5_6T \\ {}^4_3TU_3 &= T^4_5T^5_6T \\ {}^5_4TU_4 &= {}^5_6T \end{aligned} \tag{I.9} $$

I.4.2 Modélisation cinématique du robot PUMA 560

Le modèle cinématique du robot PUMA 560 est utilisé pour la conception, la simulation et la commande de robots dont l'outil de travail doit suivre une trajectoire continue à allure constante. Le modèle cinématique représente la relation entre les vitesses des articulations et la vitesse linéaire et angulaire de l'extrémité de l'effecteur[2].

I.4.2.1 Le modèle cinématique direct (MCD)

Le modèle cinématique direct d'un robot manipulateur permet de calculer les vitesses des coordonnées opérationnelles à partir des vitesses des variables articulaires [11]. Il est donné sous la forme suivante :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \Longrightarrow \begin{pmatrix} V_i \\ W_i \end{pmatrix} = J(q)\dot{q} \tag{I.10}$$

où :

- $\dot{X}$ définit le vecteur des vitesses des coordonnées opérationnelles .
- W_i définit la vitesse angulaire du repère R_n.
- V_i définit la vitesse linéaire de déplacement des coordonnées opérationnelles q_n.
- n définit le nombre de l'articulation.
- $J(q)$ désigne la matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du mécanisme, elle est en fonction de la configuration articulaire q.

Calcul de la matrice jacobienne par le modèle géométrique direct se fait par la dérivation des coordonnées cartésiennes $X \in R^m$ par rapport aux coordonnées généralisées $q \in R^n$ tel que :

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{dX_1}{dq_1} & \cdots & \frac{dX_1}{dq_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dX_m}{dq_1} & \cdots & \frac{dX_m}{dq_n} \end{bmatrix} \tag{I.11}$$

I.4.2.2 Modèle cinématique inverse du robot PUMA 560

Le modèle cinématique inverse (MCI) d'un robot manipulateur permet de calculer, à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaires $\dot{q}$ qui assurent au repère terminal une vitesse des coordonnées opérationnelle $\dot{X}$ grâce à la relation (I.10)[12] :

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{X} \tag{I.12}$$

d'où

- J^{-1} la matrice inverse de la Jacobienne $J(q)$

Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique direct (I.10) en résolvant un système d'équations dont les solutions sont données par la relation suivante

$$\begin{pmatrix} \dot{q_1} \\ \vdots \\ \dot{q_n} \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} V_i \\ W_i \end{pmatrix} \tag{I.13}$$

I.4.3 Modélisation dynamique du robot PUMA 560

Le modèle dynamique d'un robot manipulateur a un rôle important dans l'analyse de son comportement pour la conception des méthodologies de commande et pour la simulation du mouvement. Le modèle dynamique d'un robot représente son évolution dans le temps au travers une relation entre les couples/ forces appliqués et le mouvement résultant du robot.

I.4.3.1 Modèle dynamique direct (MDD)

Le modèle dynamique direct (MDD) d'un robot manipulateur détermine les accélérations articulaires en fonction des positions, des vitesses articulaires et des forces/couples appliqués aux articulations[2]. Il est décrit par l'équation suivante :

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, \tau, F_{ext}) \tag{I.14}$$

- $\ddot{q}$: vecteur des accélérations articulaires.
- q : vecteur des positions articulaires.
- $\dot{q}$: vecteur des vitesses articulaires.
- τ : vecteur des couples.
- F_{ext} : vecteur des efforts extérieurs (forces et couples)

I.4.3.2 Modèle dynamique inverse (MDI)

Le modèle dynamique inverse (MDI) d'un robot manipulateur permet de déterminer les couples (ou les forces) appliqués aux actionneurs en fonction des positions, vitesses et des efforts généralisés [2]. Il est décrit par l'équation suivante :

$$\tau = f(\ddot{q}, \dot{q}, q, F_{ext}) \tag{I.15}$$

Il existe plusieurs formalismes pour le calcul du modèle dynamique d'un robot manipulateur, on peut citer les deux formalismes les plus utilisés :

- **Le formalisme de Newton Euler** est une approche basée sur les forces et les moments agissant entre les articulations.
- **Le formalisme de Lagrange** est une approche basée sur l'énergie.

Dans ce travail, on utilisera le formalisme de Lagrange pour calculer le MDI du robot PUMA 560.

La formalisme de Lagrange est utilisé pour décrire les équations du mouvement de plusieurs corps, les uns par rapport aux autres. Ces équations sont définies en fonction des énergies cinétiques et des énergies potentielles d'un système comme suit [13] :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \tag{I.16}$$

Avec :

- L : s'appelle le Lagrangien, donné par $L = T - U$
- T : L'énergie cinétique
- U : L'énergie potentielle.
- τ : Couple moteur des articulations.
- $i = [1 \dots 6]$ numéros des degrés de liberté du robot.

L'énergie cinétique du robot est une fonction quadratique des vitesses articulaires, elle est définie par :

$$T = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{2}m_i V_i^2 + \frac{1}{2}I_i q_i^2\right) \tag{I.17}$$

D'où

- V_i : Vitesse linéaire du corps i.
- m_i et I_i : masse et le moment d'inertie du corps i par rapport au centre de gravité.

Pour l'énergie potentielle $U(q)$, elle est définie par :

$$U = \sum_{i=1}^{n}(m_i \ g \ P_{ci}) \tag{I.18}$$

Avec :

P_{ci} : Vecteur des coordonnées du centre de gravité du corps i et g le vecteur de gravité.

I.4.3.3 Obtention du modèle dynamique inverse du robot PUMA 560

Après avoir appliqué le formalise Lagrange (I.16), les équations constituant le modèle dynamique inverse du robot PUMA 560 peuvent se mettre sous la forme compacte suivante :

$$M(q)\ddot{q} + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)\dot{q}^2 + G(q) + F(\dot{q}) = \tau \tag{I.19}$$

Avec :

- $M(q)$ est une matrice d'inertie (symétrique définie positive)(6×6).
- $B(q)$ est une matrice des forces Coriolis (6×15).
- $C(q)$ est une matrice des forces centrifuges (6×6).
- $G(q)$ est un vecteur des forces de gravité (6×1).
- $F(\dot{q})$ est un vecteur de frottement (6×1).
- $\ddot{q}$ est un vecteur d'accélération (6×1).

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 & \ddot{q}_2 & \ddot{q}_3 & \ddot{q}_4 & \ddot{q}_5 & \ddot{q}_6 \end{bmatrix}^T \tag{I.20}$$

Le vecteur $[\dot{q}\dot{q}]$ est défini par :

$$[\dot{q}\dot{q}] = \begin{bmatrix} \dot{q}_1\dot{q}_2 & \dot{q}_1\dot{q}_3 & \cdots & \dot{q}_1\dot{q}_n, \dot{q}_2\dot{q}_3, \dot{q}_2\dot{q}_4 & \dot{q}_{n-2}\dot{q}_n & \dot{q}_{n-1}\dot{q}_n \end{bmatrix}^T \text{ avec } n = 6 \tag{I.21}$$

Et le vecteur $\dot{q}^2$ est défini par :

$$\dot{q}^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 & \dot{q}_2^2 & \dot{q}_3^2 & \dot{q}_4^2 & \dot{q}_5^2 & \ddot{q}_6^2 \end{bmatrix}^T \tag{I.22}$$

Remarque :

A partir du modèle dynamique du robot PUMA 560 dans l'équation (I.19), nous considérons dans ce travail les trois axes du robot à savoir les articulations $q_4 = q_5 = q_6 = 0$ verrouillées [9], et ce pour présenter les résultats de simulations pour le suivi de trajectoire des trois premières articulations seulement, à savoir q_1, q_2, q_3 du robot PUMA 560. Ainsi, les matrices du modèle dynamique inverse du robot PUMA 560 sont définies comme suit :

Matrice d'inertie $M(q)$ de dimension (6×6)

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & 0 & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \tag{I.23}$$

La matrice de Coriolis $B(q)$ de dimension (6×15) est calculée comme suit :

$$B(q) = \begin{bmatrix} b_{112} & b_{113} & 0 & b_{115} & b_{123} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{214} & 0 & 0 & b_{223} & 0 & b_{225} & 0 & 0 & b_{235} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{314} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{421} & b_{413} & 0 & b_{415} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{514} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{I.24}$$

La matrice de Centrifuge $C(q)$ est calculée comme suit :

$$C(q) = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{51} & c_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{I.25}$$

Le vecteur de Gravité $G(q)$ est calculé comme suit :

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \\ 0 \\ g_5 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{I.26}$$

Le vecteur de Frottement $F(\dot{q})$ est choisi comme suit :

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{I.27}$$

Les coefficients des différentes matrices [5] du modèle dynamique du robot PUMA 560 ((I.23),(I.24),(I.25),(I.26),(I.27)) sont détaillés dans l'annexe A.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction sur les robots industriels et les notions de base sur la constitution et le mouvement d'un robot manipulateur. Ensuite nous avons défini une description générale du robot PUMA 560 qui sera exploité dans ce travail, puis la modélisation mathématique de ce dernier. Le formalisme de Lagrange a été adopté afin d'obtenir le modèle dynamique inverse du robot PUMA 560. Ce modèle sera utilisé dans les chapitres suivants dans la conception des lois de commande en position pour le suivi de trajectoire.

Chapitre II

La Commande par mode glissant du robot manipulateur PUMA 560

II.1 Introduction

Le modèle dynamique d'un robot manipulateur contient des non-linéarités et un fort couplage entre les différentes articulations, ce qui rend le contrôle de ce dernier en utilisant des méthodes classiques insuffisant. Différentes approches de commande ont été adoptées pour faire face à ces problèmes qu'elles soient linéaires ou non linéaires. Dans ce travail, nous avons choisi la commande par mode glissant pour l'élaboration des lois de commande pour le robot PUMA 560. L'avantage de cette approche de commande est la robustesse vis-à-vis des incertitudes et perturbations sur le système dynamique. La conception d'une telle commande permet d'atteindre une position désirée de manière précise et d'avoir une bonne poursuite de la trajectoire. Dans ce chapitre, nous allons présenter la commande par mode glissant, ses avantages et inconvénients ainsi que l'application de cette approche sur le robot PUMA 560.

II.2 Principes de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant (MG) est une méthode puissante de contrôle de la rétroaction d'état pour les systèmes non linéaires avec des modifications structurelles afin d'obtenir des performances optimales telles que : la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité d'implantation, et l'invariance [14–16]. Le contrôleur se compose de deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système pendant le mode glissant et une partie discontinue représentant la dynamique du système pendant le mode de convergence, qui a un rôle important dans le contrôle pour éliminer les effets des forces externes et des perturbations [17].

La conception d'une loi de commande par mode glissant capture systématiquement les problèmes de stabilité, de suivi de trajectoire et de rejet de perturbation. La mise en œuvre de cette méthode de contrôle comprend trois étapes [18] :

- Choix des surfaces de glissement.
- Conditions d'existence de convergence .
- Détermination la loi de commande.

II.2.1 Choix des surfaces de glissement

Soit le système non linéaire décrit par l'équation différentielle [19] suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u \\ y = h(x) \end{cases} \tag{II.1}$$

Avec :

- u est le vecteur de l'entrée de commande
- $\dot{x}$ est le vecteur d'état du système
- $f(x,t)$ est une fonction non linéaire inconnue ou incertaine.
- $g(x,t)$ est une fonction non linéaire inconnue ou incertaine.

L'objectif principal d'une tâche de suivi de trajectoire pour un robot manipulateur est de converger vers un vecteur d'état désiré x_d. Pour choisir la forme de la surface de glissement, Slotin [16] a proposé une forme générale dans le plan de phase selon l'ordre du système, qui est définie par :

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x,t) \tag{II.2}$$

- λ une constante positive
- $e(x,t)$ vecteur d'erreur de position, qui est défini par :

$$e(x,t) = x(t) - x_d(t) \tag{II.3}$$

- r Le degré relatif. Il est défini par le nombre de fois de la dérivée de la sortie y par rapport au temps jusqu'à apparaitre l'entrée de commande u. Par exemple :

  $r = 1 : s(x,t) = e(x,t)$

  $r = 2 : s(x,t) = \lambda e(x,t) + \dot{e}(x,t)$

  $r = 3 : s(x,t) = \lambda^2 e(x,t) + 2\lambda\dot{e}(x,t) + \ddot{e}(x,t)$

II.2.2 Conditions d'existence de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont des règles qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement quelles que soient les perturbations. Il existe deux approches d'assurer le mode de convergence.

II.2.2.1 La fonction discrète de commutation

Cette méthode est la plus ancienne qui a été proposée et étudiée par Emelyanov et Utkin [14, 15], et consiste à donner à la surface de glissement une dynamique convergente vers zéro, définie par :

$$u = \begin{cases} \dot{s}(x,t) > 0 & \text{si } s(x,t) < 0 \\ \dot{s}(x,t) < 0 & \text{si } s(x,t) > 0 \end{cases} \tag{II.4}$$

Cette condition peut être réécrite comme suit :

$$\dot{s}(x,t)s(x,t) < 0 \tag{II.5}$$

Elle est générale, mais ne converge pas en un temps fini. Cependant, cette condition est difficilement utilisable pour compiler des lois de commande.

II.2.2.2 Fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $V > 0$. Cette fonction est généralement utilisée pour assurer la stabilité des systèmes non linéaires[17]. Il faut choisir une loi de commutation qui doit décroître la dérivée de la fonction de Lyapunov, et donc $\dot{V} < 0$. L'idée de base de cette approche est de définir la fonction scalaire $s(x,t)$ pour assurer l'attractivité de la variable commandée par l'état désiré.

Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante :

$$V = \frac{1}{2}s^2(x,t) \tag{II.6}$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V} = \dot{s}(x,t)s(x,t) \tag{II.7}$$

Pour réduite la fonction de Lyapunov, il suffit de s'assurer que la dérivée temporelle de V est complètement négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{V} = \dot{s}(x,t)s(x,t) < 0 \tag{II.8}$$

Si la condition (II.8) est validée, la variable de glissement et sa dérivée sont toujours de signes opposés, quel que soit le temps. Néanmoins, la condition (II.8) ne garantie qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement. Afin d'assurer une convergence en temps fini, cette condition est remplacée par une autre plus restrictive

dite de η attractivité qui est donnée par :

$$\dot{s}(x,t)s(x,t) < \eta\,|s| \tag{II.9}$$

Avec :

- η est une constante positive définissant le temps de convergence t_r.
- Le temps de convergence, ou le temps d'arrivée « reaching time » t_r dépend directement du choix de la surface de glissement [18].

$$t_r = \frac{s(0)}{\eta} \tag{II.10}$$

II.2.3 La détermination de la loi de commande

Après avoir choisi la surface de glissement et vérifié les conditions d'attractivité, la prochaine étape est de déterminer la loi de commande pour assurer l'attraction des trajectoires d'état vers la surface de glissement $s(x,t) = 0$.

La loi de commande par mode de glissant classique d'ordre un est exprimée par la somme de la commande équivalente u_{eq} et la commande discontinue u_{dis}. Elle est donnée par la relation suivante :

$$u = u_{eq} + u_{dis} \tag{II.11}$$

Nous présentons d'abord la méthode de la commande équivalente u_{eq} puis la commande discontinue u_{dis}.

II.2.3.1 Détermination de la commande équivalente

La commande équivalente est une fonction continue utilisée pour maintenir les variables du contrôle sur la surface de glissement idéal $s(x,t) = 0$. Elle est obtenue en résolvant l'équation du comportement dynamique du système durant le mode de glissement[20] :

$$\dot{s}(x,t) = 0 \longrightarrow \frac{ds}{dt}(x,t) = 0 \tag{II.12}$$

$$\dot{s}(x,t) = \frac{ds}{dx}\frac{dx}{dt} \longrightarrow \frac{ds}{dx}\dot{x} \tag{II.13}$$

En remplaçant $\dot{x}$ par son expression (II.1) dans le cas de la commande équivalente dans l'équation (II.11), s'écrit comme suit :

$$\frac{ds}{dx}\left[f(x,t) + g(x,t)u_{eq}\right] = 0 \tag{II.14}$$

A partir de l'équation (II.14), on peut trouver la commande équivalente qui est représentée par l'équation suivante :

$$u_{eq} = -\left[\frac{ds}{dx}g(x,t)\right]^{-1}\left[\frac{ds}{dx}f(x,t)\right] \tag{II.15}$$

avec $\left[\frac{ds}{dx}g(x,t)\right]^{-1} \neq 0$

II.2.3.2 Détermination la commande discontinue

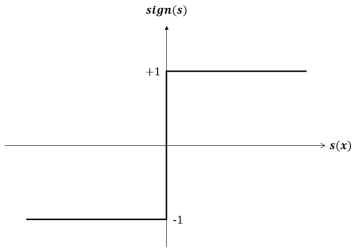
La commande discontinue est déterminée pour assurer la convergence de la sortie du système vers la surface de glissement ainsi l'insensibilité du système vis-à-vis des incertitudes et perturbations.

La forme de la commande discontinue est donnée dans l'équation (II.16), c'est une forme simple qui est généralement utilisée :

$$u_{dis} = -Ksign(s) \tag{II.16}$$

avec K une constante positive et $sign(s)$ fonction discontinue comme ci-dessous :

$$sign(s) = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad s > 0 \\ -1 & \text{si} \quad s < 0 \\ 0 & \text{si} \quad s = 0 \end{cases} \tag{II.17}$$



II.2.4 Robustesse de la commande par mode de glissement

Une caractéristique importante de la commande par mode glissant est sa robustesse par rapport aux incertitudes paramétriques et perturbations [19]. Dans le cas d'un système non linéaire que l'on suppose maintenant sujet à des perturbations externes, on a l'expression suivante :

$$\dot{x} = (\hat{f}(x,t) + \delta f(x,t)) + (\hat{g}(x,t) + \delta g(x,t))u + d(x,t) \tag{II.18}$$

Avec :

- $d(x,t)$: des perturbations externes indépendantes de l'état.
- $\delta f(x,t), \delta g(x,t)$ des incertitudes sur le terme nominal de la dérivée de $f(x,t)$ et de $g(x,t)$ respectivement.

La robustesse de la commande par mode glissant a été bien mise en évidence par la vérification des conditions de recouvrement. Cette condition (II.19) stipule que le

vecteur de perturbation $d(x,t)$ est engendré par $g(x,t)$ par [21] :

$$d(x,t) \in span[g, ad_f g, ..., ad_f^{r-2} g] \tag{II.19}$$

Si cette condition est vérifiée, on peut dire que le système est robuste et insensible aux variations de paramètres et aux perturbations.

Le calcul de l'équation (II.19) est détaillé dans l'annexe A.

II.2.5 Phénomène de broutement (chattering)

En pratique, le mode de glissement idéal n'existe pas, car il implique une commande à une fréquence infinie [19]. La discontinuité de la commande engendre un comportement dynamique particulier qui se caractérise par des oscillations de haute fréquence au voisinage de la surface de glissement, qui entraîne un phénomène de broutement, appelé réticence ou "chattering" en anglais [22]. Ce phénomène est un inconvénient car, même s'il est filtré en sortie du procédé, il peut exciter des modes en hautes fréquences non modélisés, ce qui dégrade les performances du système et peut même conduire à une instabilité.

Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont :

- la présence d'un délai limité durant le calcul de la commande.
- Les limitations des actionneurs.

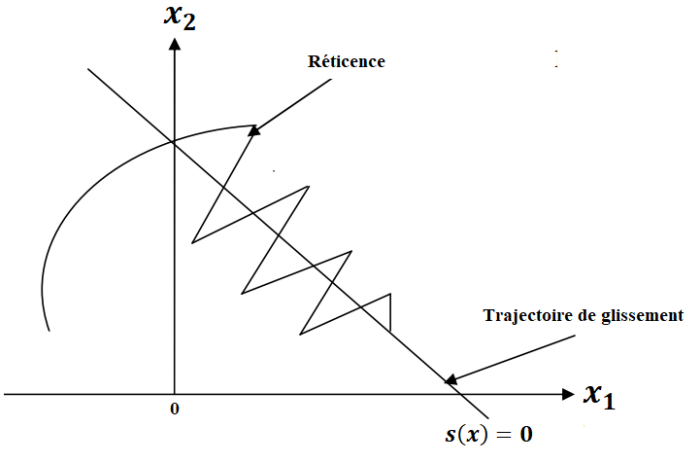


FIGURE II.1 : Le phénomène de broutement

II.2.6 Solutions pour réduire le phénomène de Broutement (chattering)

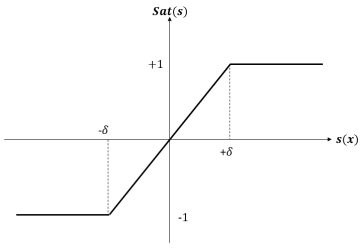
De nombreuses solutions ont été proposées pour réduire ou éliminer le phénomène de broutement. Parmi ces solutions les plus utilisées :

- Solution par l'utilisation d'une couche limite.
- Solution par des lois d'approche.
- Solution par des modes glissants d'ordre supérieur.

II.2.6.1 Solution par une couche limite

Afin de réduire le phénomène de broutement par l'utilisation d'une couche limite, on remplace la fonction discontinue $sign(s)$ par l'approximation continue de type grand gain, dans un voisinage de la surface de glissement [19], telles que les fonctions : *sigmoïde, tangent hyperbolique* $tanh(s)$,$cont(s) = \frac{s}{|s|+\phi}$ *avec* $\phi > 0$. Dans ce projet, nous utiliserons la fonction de saturation qui est donnée par (II.20) :

$$Sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{\delta} & \text{si } |s| \leq |\delta| \\ sign(s) & \text{si } |s| > |\delta| \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$



II.2.6.2 Solution par des lois d'approche

Cette solution consiste à concevoir des lois de convergence non linéaires qui permettent d'ajuster dynamiquement les composantes de la commande en fonction de l'amélioration de la fonction de glissement. Ainsi, plus le vecteur d'état est éloigné de la surface de glissement, plus cette composante est grande et tend à ramener le vecteur vers la surface [23]. Gao et Hung [24] ont proposé spécifiquement deux lois d'approche possibles pour réduire la commutation [20].

- La première loi d'approche est directement une équation différentielle spécifiant la dynamique de la fonction de commutation. Cette équation de $s(x,t)$ asymptotiquement stable est la même que la condition de glissement. De plus les caractéristiques du système dans le mode de convergence peuvent être contrôlées par un choix des paramètres de l'équation différentielle .

$$\dot{s} = -Qsign(s) - K.s \Longrightarrow \begin{cases} Q > 0 \\ K > 0 \\ sign(s) = [sign(s_1), sign(s_2), ..., sign(s_m)] \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

- La deuxième loi d'approche est une loi de convergence qui provoque un temps d'atteinte fini de la surface de glissement. Elle est donnée comme suit :

$$\dot{s} = -\alpha |s|^{\rho} sign(S) \, \text{avec} \rho \in [01] \quad \text{(II.22)}$$

II.2.6.3 Solution par les modes glissants d'ordre supérieur

La commande par mode glissant d'ordre supérieur a été introduite pour réduire le problème de broutement tout en conservant les propriétés de convergence et de robustesse des commandes par mode glissant classique. Elle est basée sur la prise en compte des dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement [22]. Il existe plusieurs variantes de la commande par mode glissant d'ordre supérieur.

II.3 Application de la commande par mode glissant classique au robot PUMA 560

Dans cette section, nous développons des lois de commande par mode glissant d'ordre un pour le suivi de trajectoire du robot PUMA 560, présenté dans le premier chapitre. Nous allons considérer seulement les trois premières articulations du robot dans les simulations numériques et les trois dernières comme verrouillées. Pour cela nous utilisons l'équation dynamique inverse pour le robot PUMA 560, définie dans le premier chapitre par l'équation(I.19). Ce modèle est réécrit comme :

$$\begin{cases} \ddot{q} = M^{-1}(\tau - B(q)[\dot{q}\dot{q}] - C(q)[\dot{q}]^2 - G(q) - F(\dot{q})) \\ y = q(t) \end{cases} \tag{II.23}$$

- $q(t) = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]$ est le vecteur d'état du système.
- y est la sortie du système qui représente la position des articulations du robot.
- τ est le couple d'entrée de commande lié aux les articulations du robot.

II.3.1 L'objectif du contrôle

L'objectif du contrôle est de réaliser la tâche de suivi de trajectoire par le robot PUMA 560. Nous allons concevoir des lois de commande par mode glissant dans le but d'assurer le suivi de trajectoire des différentes articulations du robot PUMA 560 et d'annuler l'erreur de position et de vitesse et éventuellement de stabiliser le robot.

On définit les erreurs de position, de vitesse et d'accélération comme suit :

$$\begin{cases} e(t) = q - q_d \\ \dot{e}(t) = \dot{q} - \dot{q}_d \\ \ddot{e}(t) = \ddot{q} - \ddot{q}_d \end{cases} \tag{II.24}$$

Avec :

- $e(t)$ erreur de position
- $\dot{e}(t)$ erreur de vitesse

- $\ddot{e}(t)$ erreur d'accélération
- q état mesuré.
- q_d état désiré.

L'objectif de contrôle est donc :

$$\begin{matrix} \lim_{t\to\infty} e(t) = 0 \\ \lim_{t\to\infty} \dot{e}(t) = 0 \end{matrix} \tag{II.25}$$

II.3.2 Synthèse de la loi de commande avec une surface de glissement classique

II.3.2.1 Détermination la surface de glissement

La surface de glissement est sélectionnée par l'équation (II.2), avec le degré relatif du système $r = 2$, l'expression de la surface de glissement $s(e, \dot{e})$ peut-être réécrite comme suit :

$$s = \lambda e + \dot{e} \tag{II.26}$$

La dérivation de s peut être calculée comme suit :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} \tag{II.27}$$

On remplace l'équation (II.24) dans (II.27) :

$$\dot{s} = (\ddot{q} - \ddot{q}_d) + \lambda \dot{e} \tag{II.28}$$

II.3.2.2 Conception du contrôleur

Le contrôleur par mode glissant classique (MG) pour le robot PUMA 560 est basé sur la surface de glissement en utilisant la surface de glissement (II.26) est exprimé comme suit :

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{dis} \tag{II.29}$$

1. **Détermination de la commande équivalente** On utilise la condition d'invariance $\dot{s} = 0$ de la surface pour trouver la commande équivalente :

$$\dot{s} = 0 \tag{II.30}$$

On remplace (II.28) dans (II.30) :

$$(\ddot{q} - \ddot{q}_d) + \lambda \dot{e} = 0 \longrightarrow \ddot{q} = \ddot{q}_d - \lambda \dot{e} \tag{II.31}$$

Puis l'équation (II.23) dans (II.31) donne :

$$M^{-1}(\tau_{eq} - B(q)[\dot{q}\dot{q}] - C(q)[\dot{q}]^2 - G(q) - F(\dot{q})) = \ddot{q}_d - \lambda\dot{e} \tag{II.32}$$

$$\tau_{eq} = M(q)(\ddot{q}_d - \lambda\dot{e}) + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) \tag{II.33}$$

2. **La commande discontinue**

$$\tau_{dis} = -Ksign(s) \tag{II.34}$$

En remplaçant les deux équations (II.34) et (II.33) dans (II.29), la sortie du contrôle peut être écrite :

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - \lambda\dot{e}) + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) - Ksign(s) \tag{II.35}$$

II.3.2.3 Schéma de simulation de la commande MG-Classique

Le schéma fonctionnel du contrôleur par mode glissant MG-classique pour le robot PUMA 560 est donné comme suit :

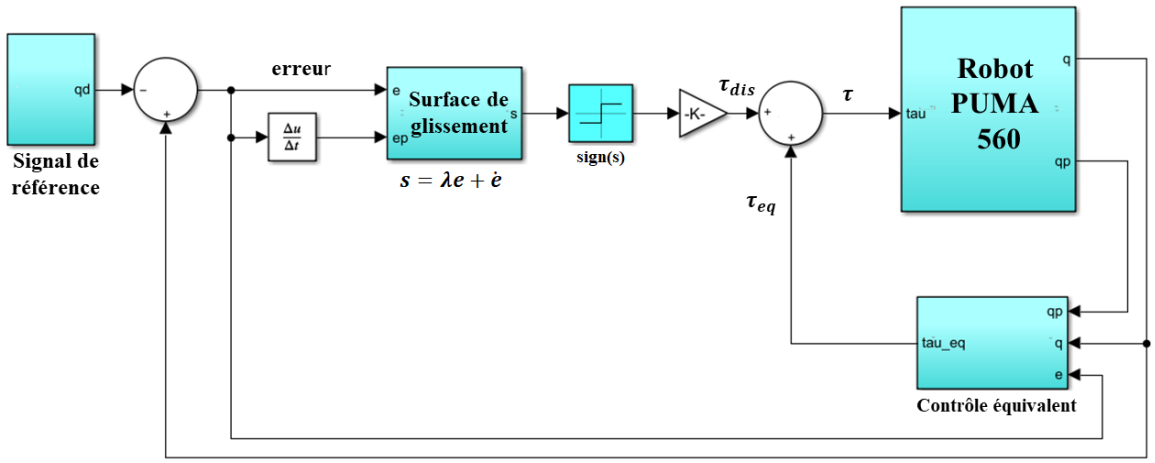


FIGURE II.2 : Schéma expérimental de la commande MG-classique

II.3.2.4 Résultats de simulation de la commande MG-Classique

Nous avons choisi les conditions initiales pour les positions articulaires suivantes :

$$\begin{aligned} q_0 &= [q_1, q_2, q_3] = [0.5, 0.75, 0](rad) \\ \dot{q}_0 &= [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3] = [0, 0, 0](rad/s) \end{aligned} \tag{II.36}$$

Pour cette simulation, une trajectoire sinusoïdale désirée q_d a été considérée pour les trois articulations du robot PUMA ayant la forme ci-dessous :

$$\begin{cases} q_{d1} = sin(t) \\ q_{d2} = sin(2t) \\ q_{d3} = sin(4t) + 0.5 \end{cases} \tag{II.37}$$

D'après l'équation (II.35) on a une commande qui assure que l'état du système converge vers les trajectoires désirées.

Les résultats de la simulation pour le suivi de trajectoire du robot PUMA 560 sont illustrés dans la figure II.3, l'erreur de position dans la figure II.4, et le couple des entrées obtenues par l'application de la commande MG-classique dans la figure II.5. Les paramètres des contrôleurs qui ont été utilisés dans la simulation sont :

$$\begin{aligned} \lambda &= [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3] = [10, 10, 10]^T \\ K &= [k_1, k_2, k_3] = [20, 60, 50]^T \end{aligned} \tag{II.38}$$

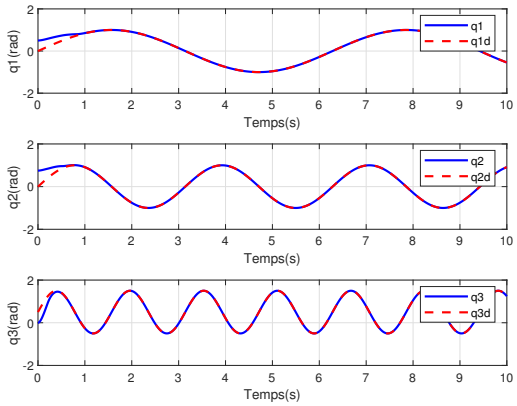


FIGURE II.3 : La trajectoire de position par la commande MG-classique

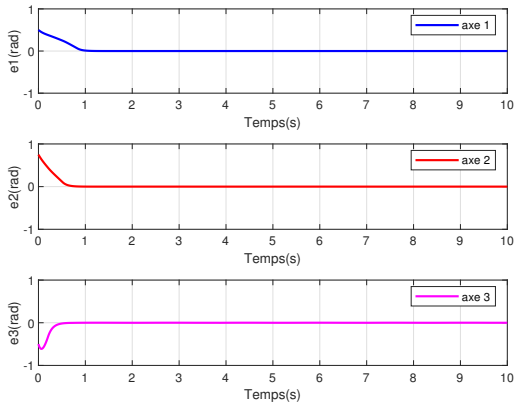


FIGURE II.4 : Erreur de position par la commande MG-classique

- Les deux figures II.3 et II.4 montrent que les trois liaisons q du robot manipulateur PUMA 560 ont convergé vers la trajectoire de référence q_d et l'erreur est nulle après la convergence ce qui signifie une bonne poursuite de trajectoire .

- La figure II.5 donne les signaux des couples d'entrée obtenus à partir de la commande MG-classique qui sont caractérisés par la présence du chattering dont la cause est la présence du terme discontinu $sign(s)$.

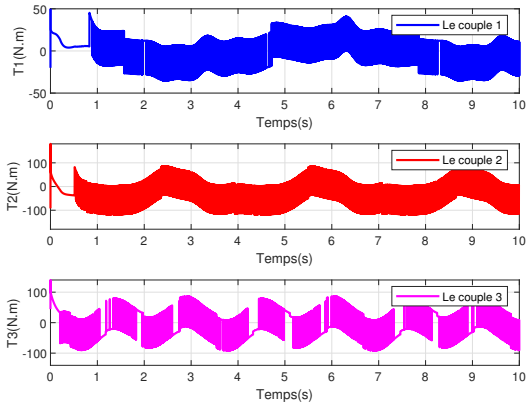


FIGURE II.5 : Le couple d'entrée par la commande MG-classique

II.3.3 Synthèse de la loi de la commande avec surface en PID

II.3.3.1 Détermination de la surface de glissement

Dans ce cas, nous avons choisi de tester une autre forme de la surface de glissement, en utilisant une surface de glissement de la forme d'un contrôleur Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID) dans l'espace d'erreur comme suit :

$$s = K_p e + K_i \int e(\varepsilon) d\varepsilon + K_d \dot{e} \tag{II.39}$$

Où les coefficients K_p, K_i, K_d sont des vecteurs de dimension (3×1) constants et strictement positifs.

La dérivée de la surface de glissement définie par (II.39) est calculée comme :

$$\dot{s} = K_p \dot{e} + K_i e + K_d \ddot{e} \tag{II.40}$$

Une condition nécessaire pour que la trajectoire de la sortie converge vers la surface de glissement s est $\dot{s} = 0$

$$\dot{s} = K_p \dot{e} + K_i e + K_d \ddot{e} = 0 \tag{II.41}$$

On remplace les équations (II.24) dans (II.41) :

$$\dot{s} = K_p \dot{e} + K_i e + K_d (\ddot{q} - \ddot{q}_d) = 0 \tag{II.42}$$

II.3.3.2 Conception du contrôleur MG-PID

Le contrôleur de mode glissant (MG-PID) est donné par (II.29) :

1. **Détermination la commande équivalente**τ_{eq} Afin d'obtenir τ_{eq} il est nécessaire de faire la solution du problème $\dot{s}(x,t) = 0$:

$$\dot{s} = K_p \dot{e} + K_i e + K_d (M^{-1}(\tau_{eq} - B(q)[\dot{q}\dot{q}] - C(q)[\dot{q}]^2 - G(q) - F(\dot{q}) - \ddot{q}_d) = 0 \tag{II.43}$$

La commande équivalente est définie par :

$$\tau_{eq} = M(q)(\ddot{q}_d - (K_p\dot{e} + K_i e)K_d^{-1} + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) \quad \text{(II.44)}$$

2. **La commande discontinue** a été donnée dans l'équation (II.34)

En remplaçant les deux formule (II.34) et (II.44) dans (II.29), la sortie du contrôleur (MG-PID) peut être écrite :

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - (K_p\dot{e} + K_i e)K_d^{-1} + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) - Ksign(s) \quad \text{(II.45)}$$

II.3.3.3 Schéma de simulation de la commande MG-PID

Le schéma expérimental de la commande par mode glissant avec la surface de glissement PID est donnée dans la figure II.6 avec la trajectoire de référence et les condition initial sont utilisée dans les équations (II.37) (II.36) respectivement.

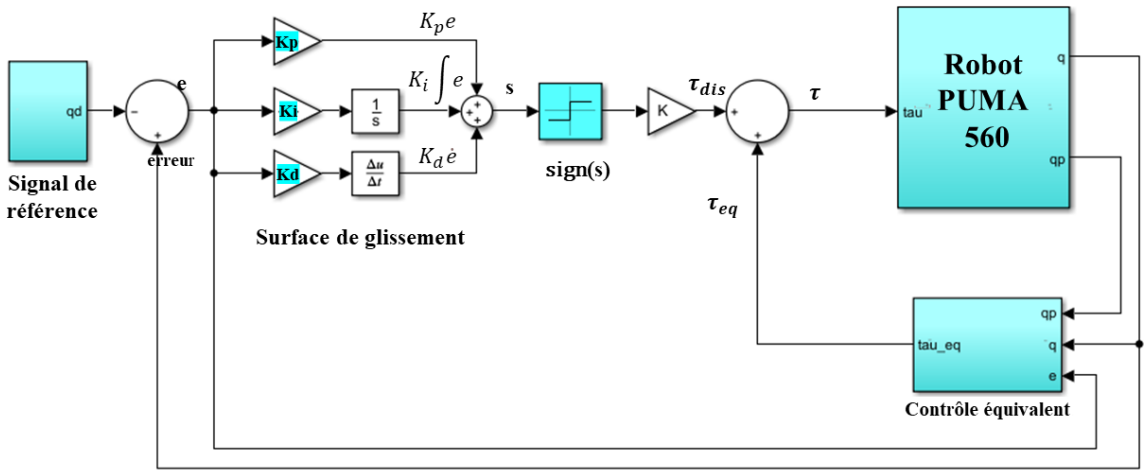


FIGURE II.6 : Schéma expérimental de la commande MG-PID

II.3.3.4 Résultats de simulation de la commande MG-PID

Les résultats de la simulation obtenue par la commande par mode glissant avec surface de glissement de type PID donnent les figures suivantes : la figure II.7 représente la poursuite de trajectoire et la figure II.8 représente l'erreur de position et la figure II.9 montre le couple des entrées du robot PUMA 560 par la commande mode glissant d'ordre un avec surface de glissement PID. Les paramètres du contrôleur qui ont été

utilisés dans la simulation sont :

$$\begin{aligned} K_p &= [k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}]^T = [10, 10, 10]^T \\ K_i &= [k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}] = [10, 10, 10]^T \\ K_d &= [k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}] = [1, 1, 1]^T \\ K &= [k_1, k_2, k_3] = [10, 30, 30]^T \end{aligned} \tag{II.46}$$

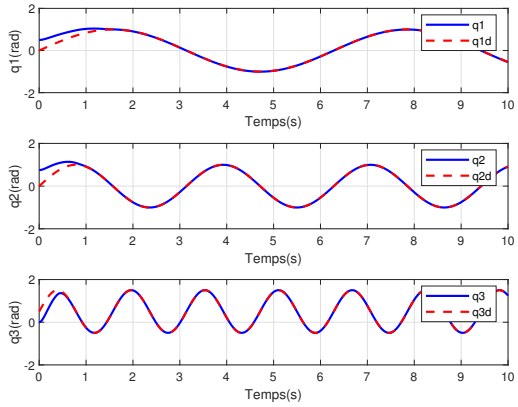


FIGURE II.7 : La trajectoire de position par la commande MG-PID

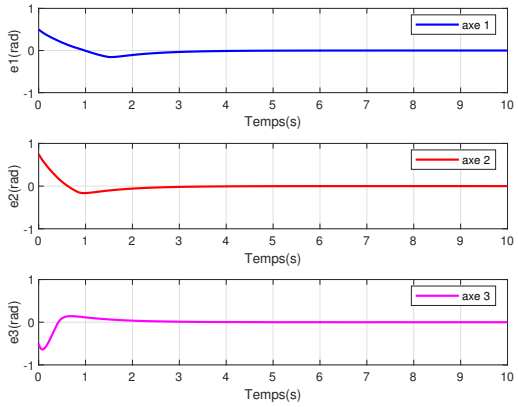


FIGURE II.8 : Erreur de position par la commande MG-PID

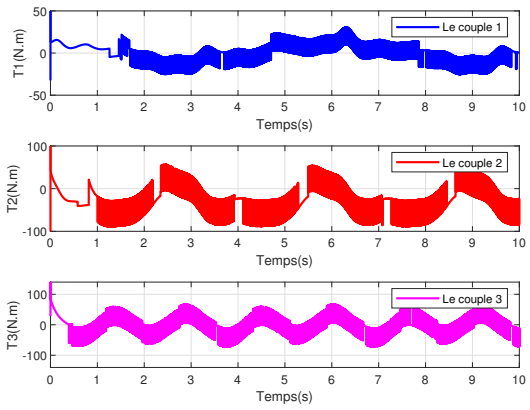


FIGURE II.9 : Le couple d'entrée par la commande MG-PID

- La figure II.7 montre que pour les trois liaisons q du robot manipulateur PUMA 560 un bon suivi de trajectoires données dans l'équation (II.37), et la figure II.8 montre que l'erreur converge vers zéro avec le temps de convergence augment.

- La figure II.9 montre que les signaux de couple d'entrée obtenus à partir du contrôleur MG-PID sont toujours touchés par le phénomène de chattering. Néanmoins, l' amplitude de ce dernier est inférieure à l'amplitude du contrôleur MG-classique à cause de l'effet d'intégrateur de l'erreur dans la surface de glissement.

On peut déduire que malgré la présence du phénomène de chattering dans les deux cas de la surface de glissement (classique et PID), la commande par mode glissant a donné de bonnes performances, dans la poursuite de la trajectoire, et la stabilité du système. Mais il n'y a qu'un seul inconvénient à ce contrôle est le phénomène de broutement, afin d'éliminer cela nous utiliserons la méthode de couche limite et la commande par mode glissant d'ordre supérieur dans ce qui suit.

II.4 Application de la commande par mode glissant avec couche limite pour le robot PUMA 560

Généralement la commande par mode de glissement avec couche limite (MGCL) est utilisée dans les problèmes de la commande discontinue pour éviter le broutement (chattering) de la force du contrôle et pour obtenir une stabilité exponentielle [25].

II.4.1 Synthèse de la loi de commande MGCL

La commande par mode glissant avec couche limite est constituée de la somme de la commande équivalente et la commande continue comme suit :

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{con} \tag{II.47}$$

1. **La commande continue** τ_{con} a été définie dans l'équation (II.20)

2. **La commande équivalente** τ_{eq} est définie dans les deux cas par l'équation (II.33) dans le cas d'une surface de glissement classique et par l'équation (II.44) dans le cas d'une surface de glissement PID respectivement.

La loi de commande avec couche limite est synthétisée comme suit pour les deux situations :

1. **Surface de glissement classique** :

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - \lambda\dot{e}) + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) - K_c Sat(s) \tag{II.48}$$

Avec λ, K_c sont des constantes positives.

2. **La surface de glissement PID**

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - (K_p\dot{e}(t) + K_i e(x,t))K_d^{-1} + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) + F(\dot{q}) - K_r Sat(s) \tag{II.49}$$

Avec K_p, K_d, K_i, K_r sont des constantes positives

II.4.2 Résultats de simulation

Le schéma fonctionnel de la commande par mode glissant avec couche limite est donné par la figure II.10.

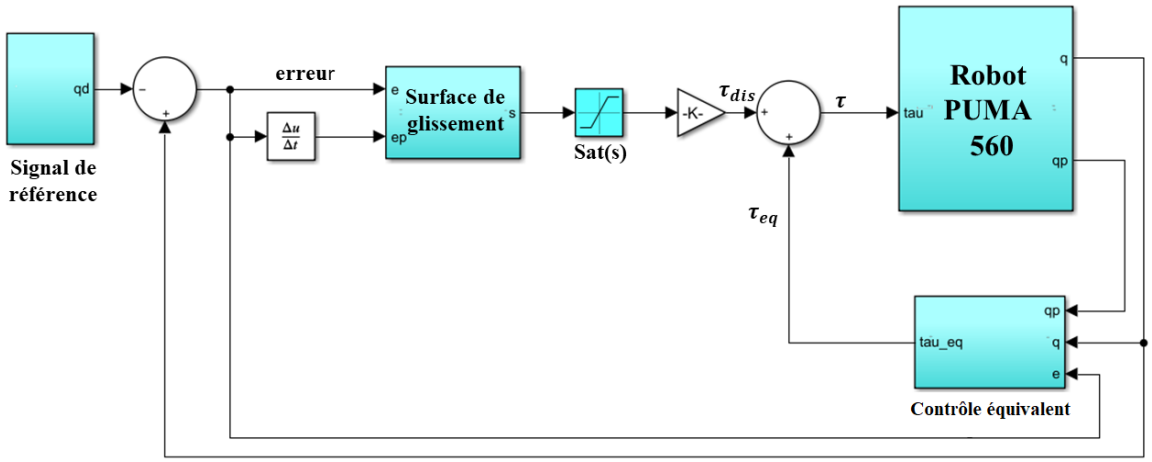


FIGURE II.10 : Le schéma expérimental de la commande MGCL

- Les paramètres du contrôleur par mode glissant avec couche limite et surface de glissement classique (MGCL-classique) sont :

$$\begin{aligned} K_c &= [30, 70, 60]^T \\ \lambda &= [10, 15, 20]^T \end{aligned} \tag{II.50}$$

- Les paramètres du contrôleur par mode glissant avec couche limite et surface de glissement PID (MGCL-PID) sont :

$$\begin{aligned} K_p &= [10, 15, 20]^T \\ K_i &= [1, 1, 1]^T \\ K_d &= [1, 1, 1]^T \\ K_r &= [30, 40, 40]^T \end{aligned} \tag{II.51}$$

Les résultats de simulation de l'application de la commande par mode glissant avec couche limite sur robot PUMA 560 sont donnés dans les figures suivantes :

- La figure II.11 et la figure II.12 montrent le suivi de trajectoire résultant de la commande par mode glissant avec couche limite (MGCL) pour les deux type de la surface de glissement. On remarque une différence entre ces deux figures dans le mode de convergence vers l'état désiré. Ce qui est illustré par les deux figures de l'erreur de position II.13 et II.14 avec une faible précision.

- Les deux figures II.15 et II.16 montrent l'annulation du phénomène de broutement sur les couples d'entrée grâce au remplacement de la fonction $sign(s)$ par un terme

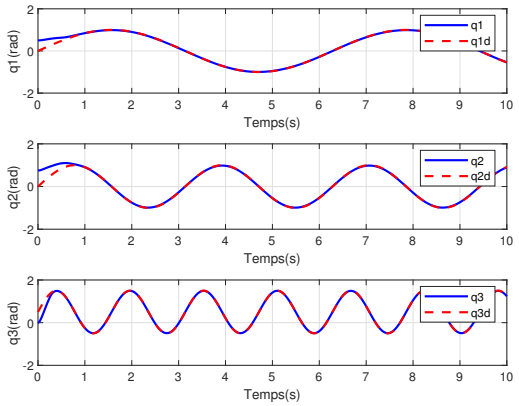


FIGURE II.11 : La trajectoire de position par la commande MGCL-classique

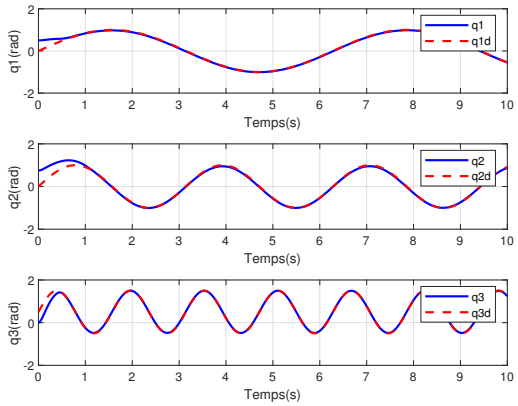


FIGURE II.12 : La trajectoire de position par la commande MGCL-PID

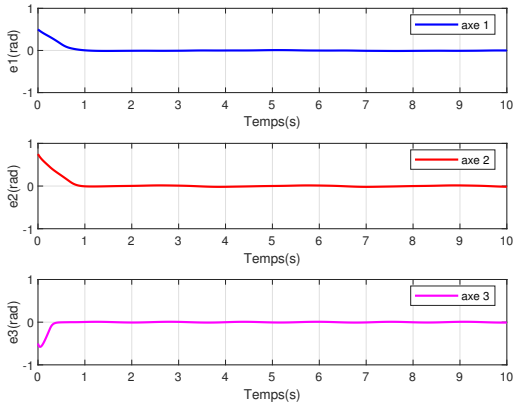


FIGURE II.13 : Erreur de position par la commande MGCL-classique

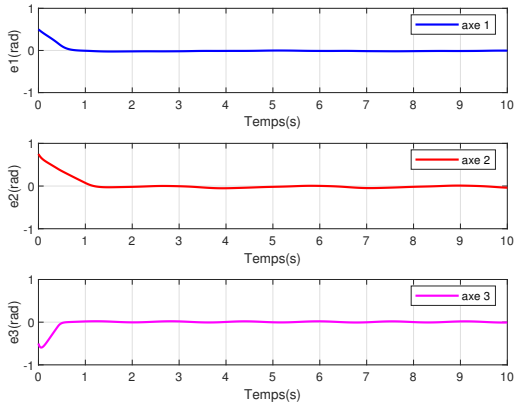


FIGURE II.14 : Erreur de position par la commande MGCL-PID

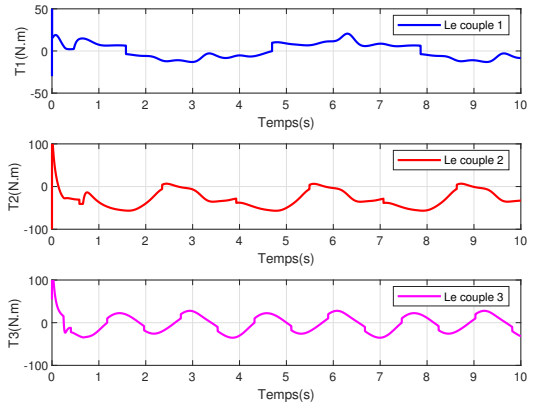


FIGURE II.15 : Le couple d'entrée par MGCL-classique

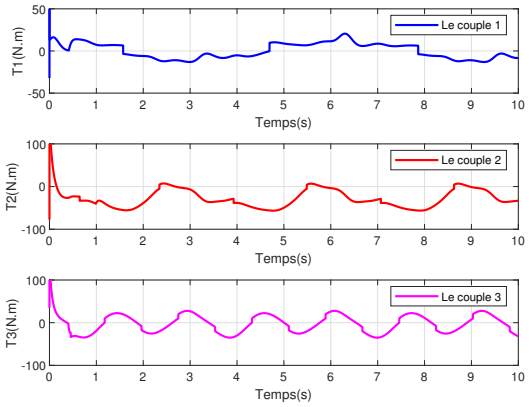


FIGURE II.16 : Le couple d'entrée par la commande MGCL-PID

continu. A noter que la différence entre les deux contrôleurs est dans le mode de

convergence par l'effet de l'intégrateur présent dans la surface de glissement PID qui réduit l'amplitude du couple d'entrée.

Lors de l'utilisation du contrôle par mode glissant avec la couche limite MGCL,le chattering du signal d'entrée de commande a disparu et le signal d'entrée de commande est devenu plus lisse. Mais le suivi de trajectoire n'était pas précis, donc nous allons utilisé une autre solution dans la section suivante.

II.5 Commande par modes glissants d'ordre supérieur

II.5.1 Principe de fonctionnement

Les contrôleurs par mode glissant d'ordre supérieur sont développés afin de réduire les effets ue phénomène de broutement (chattering) au voisinage de la surface de glissement [26]. Cette généralisation conserve les caractéristiques principales en termes de précision et de robustesses de la commande par mode glissant d'ordre un. Ils permettent aussi d'améliorer la précision asymptotique.

Cette approche est basée sur le calcul des dérivées successives de la surface de glissement s le long d'une trajectoire du système discontinu et conduit à un ordre donné à la discontinuité. Les régimes de glissement d'ordre supérieur peuvent alors être classés par la dérivée continue de la surface de glissement,p étant l'ordre de glissement [19]. Le $p^{ième}$ ordre du système est déterminé par l'équation suivante :

$$s = \dot{s} = \ddot{s}, .., s^{p-1} = 0 \tag{II.52}$$

Cependant, le principal inconvénient des algorithmes d'ordre supérieur est que le nombre d'informations nécessaires à connaître sur l'entrée augmente avec l'ordre du système glissement [19].

II.5.2 Commande par mode glissant d'ordre deux

Considérons le système non linéaire dans l'équation II.1 dont la dynamique est décrite par :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,t) + g(x,t)u \\ s &= s(x,t) \end{aligned} \tag{II.53}$$

Avec $s(x,t)$ la variable de glissement choisie pour assurer une convergence en temps fini vers l'ensemble de glissement d'ordre $p = 2$. L'objectif de ce contrôleur est de générer un régime glissant d'ordre deux sur la surface $s(t,x) = 0$ et d'obtenir en temps fini dans l'ensemble de glissement $s = \dot{s} = 0$. Voir la figure II.17.

FIGURE IV.11 : Allures des couples de commande de trois axes en mode suivi de trajectoire avec la commande MGSTF du modèle physique du robot PUMA 560

clairement la haute précision et la commande est aussi lisse sans chattering comme le montre les figures IV.9 IV.10 IV.11 respectivement.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude comparative entre les résultats obtenus des différents contrôleurs par mode glissant et par hybridation avec la logique floue que nous avons développé dans le cadre de ce projet. On conclut d'après ce chapitre que la commande par mode glissant floue d'ordre deux (MGSTF) présente une amélioration par rapport la commande mode glissant floue d'ordre un et la commande mode glissant d'ordre deux et une meilleure robustesse. Cette robustesse garantit une bonne insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques avec une élimination complète du phénomène de chattering. Puis, nous avons présenté l'application de la commande MGSTF au modèle physique du robot PUMA 560 avec une animation 3D, montrant les articulation robot PUMA 560 suivant les trajectoires de référence avec succès.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce mémoire était d'appliquer la commande intelligente hybride par mode glissant flou au robot manipulateur PUMA 560. Il s'agit de développer une loi de commande par mode glissant flou pour résoudre les problèmes de suivi de trajectoire désirées des articulations, et d'assurer la robustesse vis-à-vis des variation paramétrique et des perturbations tout en réduisant le phénomène indésirable du chattering.

La premier chapitre de notre projet présente la modélisation du robot manipulateur, en utilisant les paramètres de Denavit-Hartenberg pour calculer le modèle géométrique. Puis, en utilisant le formalisme de Lagrange, pour obtenir le modèle dynamique inverse du robot PUMA 560.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une commande par modes glissants d'ordre un avec les deux types de la surface de glissement (Classique et PIS) qui nous a permis d'améliorer les performances de notre système pour réaliser un suivi de trajectoire, mais avec l'apparition du phénomène de Chattering. Pour éliminer ce problème, nous avons remplacé la fonction signe par une fonction continue mais cette technique a donné une faible précision avec un grand temps de convergence. On a donc opter pour la commande par mode glissant d'ordre deux avec l'algorithme super-twisting.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la théorie de la logique floue et expliqué comment implémenter un contrôleur flou. Ensuite, nous avons appliqué la commande mode glissant flou du premier ordre avec surface de glissement du type PID en remplaçant la commande discontinue par la commande floue et l'adaptation des paramètres de la surface de glissement par la logique floue. Et aussi la commande par mode glissant d'ordre deux avec l'adaptation des paramètres de la loi de commande par la logique floue.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté le résultat de la simulation et l'étude comparative entre les différentes technique de la commande par MG-Classique , MGF-PID , MGST , MGSTF. Après simulation, nous avons remarqué que, la commande mode glissant flou d'ordre deux (MGSTF) donne une bonne poursuite de trajectoire et le chattering est éliminé mais aussi les performances du système sont améliorées. Nous avons confirmé que le système robuste est insensible aux variations des perturbations et aux incertitudes paramétriques.

En perspectives, il serait intéressant de réaliser la commande intelligente d'ordre supérieur sur robot manipulateur réel, et l'utilisation du contrôle adaptatif flou, et nous pouvons également améliorer l'algorithme de loi de commande en mode glissant d'ordre un en estimant le contrôle équivalent par le réseau de neurones et le contrôle discontinu par logique floue. Les deux sont des techniques de l'intelligence artificielle, car le domaine de la robotique se caractérise par l'utilisation de technologies nouvelles.

Bibliographie

[1] J. G. Tapia, "Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage," Ph.D. dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016.

[2] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling identification and control of robots*. CRC Press, 2002.

[3] K. Abdelkader, "Synthése des commandes robustes des robots manipulateurs rigides," *MÉmoire, Université d'Oran Es-Sénia*, vol. 5, 2004.

[4] "La robotique et son histoire : le robot puma," http ://ia-tpe.over-blog.com/article-la-robotique-les-premisses-de-l-ia-67999541.html.

[5] B. Armstrong, O. Khatib, and J. Burdick, "The explicit dynamic model and inertial parameters of the puma 560 arm," in *Proceedings. 1986 IEEE international conference on robotics and automation*, vol. 3. IEEE, 1986, pp. 510–518.

[6] C. Llopis-Albert, F. Rubio, and F. Valero, "Modelling an industrial robot and its impact on productivity," *Mathematics*, vol. 9, no. 7, p. 769, 2021.

[7] A. Medjebouri, F. Inel, L. Rybak, and G. Carbone, "Robust control strategies of puma 560 robot manipulator," in *The International Conference of IFToMM ITALY*. Springer, 2020, pp. 218–227.

[8] j. (71) and a. (62), "Inverse kinematics of puma 560 robot." [Online]. Available : https://hive.blog/hive-196387/@juecoree/inverse-kinematics-of-puma-560-robot

[9] F. Piltan, M. H. Yarmahmoudi, M. Shamsodini, E. Mazlomian, and A. Hosainpour, "Puma-560 robot manipulator position computed torque control methods using matlab/simulink and their integration into graduate nonlinear control and matlab courses," *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 3, pp. 167–191, 2012.

[10] T. Koehler and M. Donath, "Inverse kinematics for a multifingered hand," in *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1988, pp. 234–239.

[11] A. Ghoul, "Chapitre i modélisation des robots manipulateurs," 2016.

[12] A. Liégeois, "Modélisation et commande des robots manipulateurs," *Techniques de l'Ingénieur, S*, vol. 7, p. 730, 2000.

[13] E. Dombre and W. Khalil, *Robot manipulators : modeling, performance analysis and control*. John Wiley & Sons, 2013.

[14] S. Emelyanov, “Variable structure control systems,” 1967.

[15] V. I. Utkin, “Sliding modes and their applications in variable structure systems,” *Mir, Moscow*, 1978.

[16] J.-J. E. Slotine, W. Li, *et al.*, *Applied nonlinear control*. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991, vol. 199, no. 1.

[17] H. Talhaoui, “Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d’une machine à induction avec défauts,” Ph.D. dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.

[18] V. Bregeault, “Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants,” Ph.D. dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010.

[19] W. Perruquetti and J. P. Barbot, *Sliding mode control in engineering*. Marcel Dekker New York, 2002, vol. 11.

[20] L. Salima and T. Karima, “Commande par mode glissant neuro-flou d’un bras manipulateur,” Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, 2014.

[21] H. Sira-Ramirez, “Differential geometric methods in variable-structure control,” *International Journal of Control*, vol. 48, no. 4, pp. 1359–1390, 1988.

[22] I. Deghboudj, “Commande des systemes non lineaires par mode glissant d’ordre superieur,” 2013.

[23] P. Latosiński, “Sliding mode control based on the reaching law approach—a brief survey,” in *2017 22nd International conference on methods and models in automation and robotics (MMAR)*. IEEE, 2017, pp. 519–524.

[24] W. Gao and J. C. Hung, “Variable structure control of nonlinear systems : A new approach,” *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 45–55, 1993.

[25] I. Eker, “Sliding mode control with pid sliding surface and experimental application to an electromechanical plant,” *ISA transactions*, vol. 45, no. 1, pp. 109–118, 2006.

[26] A. Levant, “Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control,” *International journal of control*, vol. 58, no. 6, pp. 1247–1263, 1993.

[27] S. Riachy, “Contribution à l’estimation et à la commande de systèmes mécaniques sous-actionnés,” Ph.D. dissertation, Ecole Centrale de Lille, 2008.

[28] A. Levant, “Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control,” *International journal of Control*, vol. 76, no. 9-10, pp. 924–941, 2003.

[29] D. Imen, “Commande des systemes non lineaires par mode glissant d’ordre superieur,” *Master, Faculty of Technology Sciences, Algeria*, 2013.

[30] L. A. Zadeh, “Electrical engineering at the crossroads,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 8, no. 2, pp. 30–33, 1965.

[31] L. Zadeh, “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes,” *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, no. 1, pp. 28–44, 1973.

[32] H. Brahim, P. M. Najib, P. E. Fatima, and P. R. H. Aziza, “La théorie des ensembles floues et logique floue,” Mémoire de Licence, Faculté des sciences et techniques de Fès,Université USMBA,Maroc.

[33] C. Raymond, "Commande floue monovariable et multivariable selon l'expertise et par modélisation floue.(méthodologie et application aux systèmes automobiles)," Ph.D. dissertation, INSA de Toulouse, 1995.

[34] M. Roopaei and M. Z. Jahromi, "Chattering-free fuzzy sliding mode control in mimo uncertain systems," *Nonlinear Analysis : Theory, Methods & Applications*, vol. 71, no. 10, pp. 4430–4437, 2009.

[35] Z. Sun, Y. Ling, X. Tan, Y. Zhou, and Z. Sun, "Designing and application of type-2 fuzzy pid control for overhead crane systems," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 10–22, 2021.

[36] A. F. Amer, E. A. Sallam, and W. M. Elawady, "Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 dof planar robot manipulators," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 8, pp. 4943–4953, 2011.

[37] J. Fei and Z. Feng, "Adaptive fuzzy super-twisting sliding mode control for micro-gyroscope," *Complexity*, vol. 2019, 2019.

[38] "Racine de l'erreur quadratique moyenne." [Online]. Available : https://fr.wikipedia.org/wiki/Racine_de_l%27erreur_quadratique_moyenne#:~:text=La%20racine%20de%20l'erreur,valeurs%20observ%C3%A9es%20(ou%20vraies%20valeurs

[39] "Simscape multibody." [Online]. Available : https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html

Annexe A

Annexe A

A.1 Modélisation du robot manipulateur PUMA 560

Nous avons abrégé les fonctions trigonométriques en écrivant comme suit [5] :

$$\begin{aligned} C1 &= cos(q_1) \\ C2 &= cos(q_2) \\ C3 &= cos(q_3) \\ C4 &= cos(q_4) \\ C5 &= cos(q_5) \\ C6 &= cos(q_6) \end{aligned} \quad (A.1) \qquad \begin{aligned} S1 &= sin(q_1) \\ S2 &= sin(q_2) \\ S3 &= sin(q_3) \\ S4 &= sin(q_4) \\ S5 &= sin(q_5) \\ S6 &= sin(q_6) \end{aligned} \quad (A.2) \qquad \begin{aligned} S223 &= sin(q_2 + q_2 + q_3) \\ C23 &= cos(q_2 + q_3) \\ CC2 &= cos(q_2) \times cos(q_2) \\ CS4 &= cos(q_4) \times sin(q_4) \\ S5 &= sin(q_5) \\ S6 &= sin(q_6) \end{aligned} \quad (A.3)$$

A.1.1 Modèle géométrique direct du robot PUMA 560

Pour l'équation (I.4), Les détails des matrices dans les équations (I.5) et (I.6) pour le robot manipulateur PUMA 560 [5] sont calculées par les équations suivantes :

$$N_x = C6 \times (C5 \times (C4 \times C23 \times C1 + S1 \times S1) + S5 \times S23 \times C1) + S6 \times (S1 \times C23 \times C1 - C4 \times S1) \quad (A.4)$$

$$N_y = C6 \times (C5 \times (C4 \times C23 \times S1 - S4 \times C1) + S5 \times S23 \times S1) + S6 \times (S4 \times C23 \times S1 + C4 \times C1) \quad (A.5)$$

$$N_z = C6 \times (C5 \times C4 \times S23 - S5 \times C23) + S6 \times S4 \times S23 \quad (A.6)$$

$$B_x = -S6 \times (S5 \times (C4 \times C23 \times C1 + S4 \times S1) + S5 \times S23 \times C1) + C6 \times (S4 \times C23 \times C1 - C4 \times S1) \quad (A.7)$$

$$B_y = -S6 \times (C5 \times (C4 \times C23 \times S1 - S4 \times C1) + S5 \times S23 \times S1) + C6 \times (S4 \times C23 \times S1 + C4 \times C1) \quad \text{(A.8)}$$

$$B_z = -S6 \times (C5 \times C4 \times S23 - S5 \times C23) + C6 \times S4 \times S23 \quad \text{(A.9)}$$

$$T_x = S5 \times (C4 \times C23 \times C1 + S4 \times S1) - C5 \times S23 \times C1 \quad \text{(A.10)}$$

$$T_y = S5 \times (C4 \times C23 \times S1 - S4 \times C1) - C5 \times S23 \times S1 \quad \text{(A.11)}$$

$$T_z = S5 \times C4 \times S23 + C5 \times C23 \quad \text{(A.12)}$$

$$P_x = 0.4331 \times S23 \times C1 + 0.0203 \times C23 \times C1 - 0.1491 \times S1 + 0.4318 \times C2 \times C1 \quad \text{(A.13)}$$

$$P_y = 0.4331 \times S23 \times S1 + 0.0203 \times C23 \times S1 + 0.1491 \times C1 + 0.4312 \times C2 \times S1 \quad \text{(A.14)}$$

$$P_z = -0.4331 \times C23 + 0.0203 \times S23 + 0.4318 \times S2 \quad \text{(A.15)}$$

A.1.2 Modèle dynamique du robot PUMA 560

Les coefficients des différentes matrices du modèle dynamique du robot PUMA 560 [5] ((I.23), (I.24), (I.25), (I.26)) sont calculées par les équations suivantes :

A.1.2.1 la Matrice $M(q)$ est calculée comme suit

:

$$m_{11} = I_{m1} + I_1 + I_3 \times CC2 + I_7 S23 \times S23 + I_{10} \times S23 \times C23 + I_{11} S2 \times C2 + I_{21} \times S23 \times S23 + 2 + I_5 \times C2 \times S23 + I_{12} \times C2 \times C23 + I_{15} \times S23 \times S23 + I_{16} \times C2 \times S23 + I_{22} \times S23 \times C12 \quad \text{(A.16)}$$

$$m_{12} = I_4 \times S2 + I_8 \times C23 + I_9 \times C2 \times I_{13} \times S23 - I_{18} \times C23 \quad \text{(A.17)}$$

$$m_{13} = I_8 \times C23 + I_{13} \times S23 - I_{18} \times C23 \quad \text{(A.18)}$$

$$m_{22} = I_{m2} + I_2 \times I_6 + 2[I_5 \times S3 + I_{12} \times C2 + I_{15} + I_{16} \times S3] \quad \text{(A.19)}$$

$$m_{33} = I_{m3} + I_6 + 2 \times I_{15} \quad \text{(A.20)}$$

$$m_{35} = I_{15} + I_{17} \quad \text{(A.21)}$$

$$m_{44} = I_{m4} + I_{14} \quad \text{(A.22)}$$

$$m_{66} = I_{m6} + I_{23} \quad \text{(A.23)}$$

$$m_{21} = m_{12},\ m_{31} = m_{13} \text{ et } m_{32} = m_{23} \quad \text{(A.24)}$$

A.1.2.2 la Matrice $B(q)$ est calculée comme suit

:

$$b_{112} = 2 \times (-I_3 \times S2 \times C2 + I_5 \times C223 + I_7 \times S23 \times C23 - I_{12} \times S223 + I_{15} \times 2 \times S23 \times C23 + I_{16} \times C223 + I_{21} \times S23 \times C23 + I_{22} \times (1 - 2 \times S23^2)) + I_{10} \times (1 - 2 \times S23^2) + I_{11} \times (1 - 2 \times S2^2); \quad (A.25)$$

$$b_{113} = 2 \times (I_5 \times C23 \times C2 + I_7 \times S23 \times C23 - I_{12} \times S23 \times C2 + I_{15} \times 2 \times S23 \times C23 + I_{16} \times C2 \times C23 + I_{21} \times S23 \times C23 + I_{22} \times (1 - 2 \times S23^2)) + I_{10} \times (1 - 2 \times S23^2); \quad (A.26)$$

$$b_{115} = 2 \times (-S23 \times C23 + I_{15} \times S23 \times C23 + I_{16} \times C2 \times C23 + I_{22} \times C23^2); \quad (A.27)$$

$$b_{123} = 2 \times (-I_8 \times S23 + I_{13} \times C23 + I_{18} \times S23) \quad (A.28)$$

$$b_{214} = I_{14} \times S23 + I_{19} \times S23 + I_{20} \times S23; \quad (A.29)$$

$$b_{223} = 2 \times (-I_{12} \times S3 + I_5 \times C3 + I_{16} \times C3); \quad (A.30)$$

$$b_{225} = 2 \times (I_{16} \times C3 + I_{22}); \quad (A.31)$$

$$b_{235} = b_{225}; \quad (A.32)$$

$$b_{314} = (I_{20} \times + I_{14} + I_{19}) \times S23; \quad (A.33)$$

$$b_{412} = -b_{214}; \quad (A.34)$$

$$b_{413} = -b_{314}; \quad (A.35)$$

$$b_{415} = -I_{20} \times S23 - I_{17} \times S23; \quad (A.36)$$

$$b_{514} = -b_{415}; \quad (A.37)$$

A.1.2.3 la Matrice $C(q)$ est calculée comme suit

:

$$c_{12} = I_4 \times C2 - I_8 \times S23 - I_9 \times S2 + I_{13} \times C23 + I_{18} \times S23; \quad (A.38)$$

$$c_{13} = 0.5 \times b_{123}; \quad (A.39)$$

$$c_{21} = -0.5 \times b_{112}; \quad (A.40)$$

$$c_{23} = 0.5 \times b_{223}; \quad (A.41)$$

$$c_{31} = -0.5 \times b_{113}; \quad (A.42)$$

$$c_{32} = -c_{23}; \quad (A.43)$$

$$c_{51} = -0.5 \times b_{115}; \quad (A.44)$$

$$c_{52} = -0.5 \times b_{225}; \tag{A.45}$$

A.1.2.4 Le vecteur $G(q)$ est calculée comme suit

:

$$g_2 = g_{01} \times C2 + g_{02} \times S23 + g_{03} \times S2 + g_{04} \times C23 + g_{05} \times S23 \tag{A.46}$$

$$g_3 = g_{02} \times S23 + g_{04} \times C23 + g_{05} \times S23 \tag{A.47}$$

$$g_5 = g_{05} \times S23 \tag{A.48}$$

A.1.2.5 Le vecteur $F(\dot{q})$ est calculée comme suit

:

$$f_1 = 5\dot{q}_1 + 5sign(\dot{q}_1) \tag{A.49}$$

$$f_2 = 10\dot{q}_2 + 5sign(\dot{q}_2) \tag{A.50}$$

$$f_3 = 10\dot{q}_3 + 5sign(\dot{q}_3) \tag{A.51}$$

La constante d'inertie et la constante gravitationnelle sont présentées dans les tableaux A.1 et A.2 sur la base des études menées par Armstrong [5] et Corke :

$I_1 = 1.43 \pm 0.05$	$I_2 = 1.75 \pm 0.05$	$I_3 = 1.38 \pm 0.05$
$I_4 = 0.69 \pm 0.02$	$I_5 = 0.372 \pm 0.031$	$I_6 = 0.333 \pm 0.016$
$I_7 = 0.298 \pm 0.029$	$I_8 = -0.134 \pm 0.014$	$I_9 = 0.0238 \pm 0.012$
$I_{10} = -0.0213 \pm 0.0022$	$I_{11} = -0.0142 \pm 0.0070$	$I_{12} = -0.011 \pm 0.0011$
$I_{13} = -0.00379 \pm 0.0009$	$I_{14} = 0.00164 \pm 0.000070$	$I_{15} = 0.00125 \pm 0.0003$
$I_{16} = 0.00124 \pm 0.0003$	$I_{17} = 0.000642 \pm 0.0003$	$I_{18} = 0.000431 \pm 0.00013$
$I_{19} = 0.0003 \pm 0.00014$	$I_{20} = -0.000202 \pm 0.0008$	$I_{21} = -0.0001 \pm 0.0006$
$I_{22} = -0.000058 \pm 0.000015$	$I_{23} = 0.00004 \pm 0.00002$	$I_{m1} = 10.14 \pm 0.54$
$I_{m2} = 40.71 \pm 0.54$	$I_{m3} = 0.827 \pm 0.093$	$I_{m4} = 0.2 \pm 0.016$
$I_{m5} = 0.179 \pm 0.014$	$I_{m6} = 0.193 \pm 0.016$	

TABLEAU A.1 : Constante inertielle ($Kg.m^2$)

$g_{01} = -37.2 \pm 0.5$	$g_{02} = -8.44 \pm 0.20$	$g_{03} = 1.02 \pm 0.5$
$g_{04} = 0.249 \pm 0.025$	$g_{05} = -0.0282 \pm 0.0056$	

TABLEAU A.2 : Constante gravitationnelle ($N.m$)

A.2 La condition de recouvrement

Le calcul de l'équation (II.19)

$$ad_f g = [f, g] = \frac{\partial g}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial x} g(x) \tag{A.52}$$

ملخص

يتعلق مشروع التخرج الخاص بنا بتطوير وحدة تحكم ذكية وقوية من خلال أوضاع انزلاقية ذات ترتيب أعلى لتنظيم ومراقبة مسار روبوت مناور . إنها مسألة دمج إحدى تقنيات الذكاء الاصطناعي، وهي المنطق الضبابي، مع التقنيات الحديثة للتحكم القوي عن طريق الوضع المنزلق من أجل التغلب على مشاكل التحكم في الأنظمة الروبوتية المرتبطة بشكل أساسي بعدم الخطية للنماذج الديناميكية، لأوجه عدم اليقين وكذلك الاضطرابات الخارجية. سيتم تقييم أداء وحدة التحكم المطورة من خلال اختبارات المحاكاة المختلفة. كما سيتم إجراء دراسة مقارنة مع تقنيات التحكم التقليدية.

الكلمات المفتاحية : أسلوب الانزلاق، مراقب بالأنظمة المنزلقة ذات الرتبة، المنطق الغامض، الصلابة، تصميم المسار.

Résumé

Notre projet de fin d'études porte sur l'élaboration d'un contrôleur intelligent et robuste par modes glissants d'ordre supérieur pour le suivi de trajectoire du robot manipulateur PUMA 560. Il s'agit de combiner une des techniques d'intelligence artificielle à savoir la logique floue avec les techniques de commande robuste par mode de glissement afin de surmonter les problèmes de commande des systèmes robotiques essentiellement liée aux non-linéarités des modèles dynamiques, aux incertitudes paramétriques ainsi qu'aux perturbations externes. La performance du contrôleur élaboré a été évaluée à travers des simulations numériques de suivi de trajectoire. Une étude comparative avec des techniques de commandes classiques par mode glissant a aussi été effectuée.

Mots clés : Commande par mode glissant, Commande par mode glissant d'ordre supérieur, La logique floue , Robot manipulateur, Robustesse, Suivi de trajectoire.

Abstract

Our graduation project concerns the development of an intelligent and robust controller by higher order sliding modes for trajectory tracking of the PUMA 560 robot manipulator. The controller is designed by combining one of the techniques of artificial intelligence, namely fuzzy logic, with algorithms of sliding mode robust control in order to overcome the problems of control of robotic systems essentially linked to the non-linearity of the dynamic models, to the parametric uncertainties as well as external disturbances. The performance of the developed controller has been evaluated through simulation tests of trajectory tracking. A comparative study with conventional robust sliding mode control techniques has also been carried out.

Key words : Sliding mode control, Higher order sliding mode control, Fuzzy logic, Robot manipulator, Robustness, Trajectory tracking.