



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Electronique

Electronique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
NOUARI Ferial HRAKI Mayada

Le : Lundi 27 juin 2022

Commande PID Adaptative d'un Robot manipulateur à 2ddl

Jury :

Mr	Guesbaya Tahar	MCA	Universite de Biskra	Président
Mme	Ouarhlent Saloua	MAA	Universite de Biskra	Encadreur
Mme	Hamaizia Zohra	MCA	Universite de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Electronique

Réf. : Entrez la référence du document

Commande PID Adaptative d'un Robot manipulateur à 2ddl

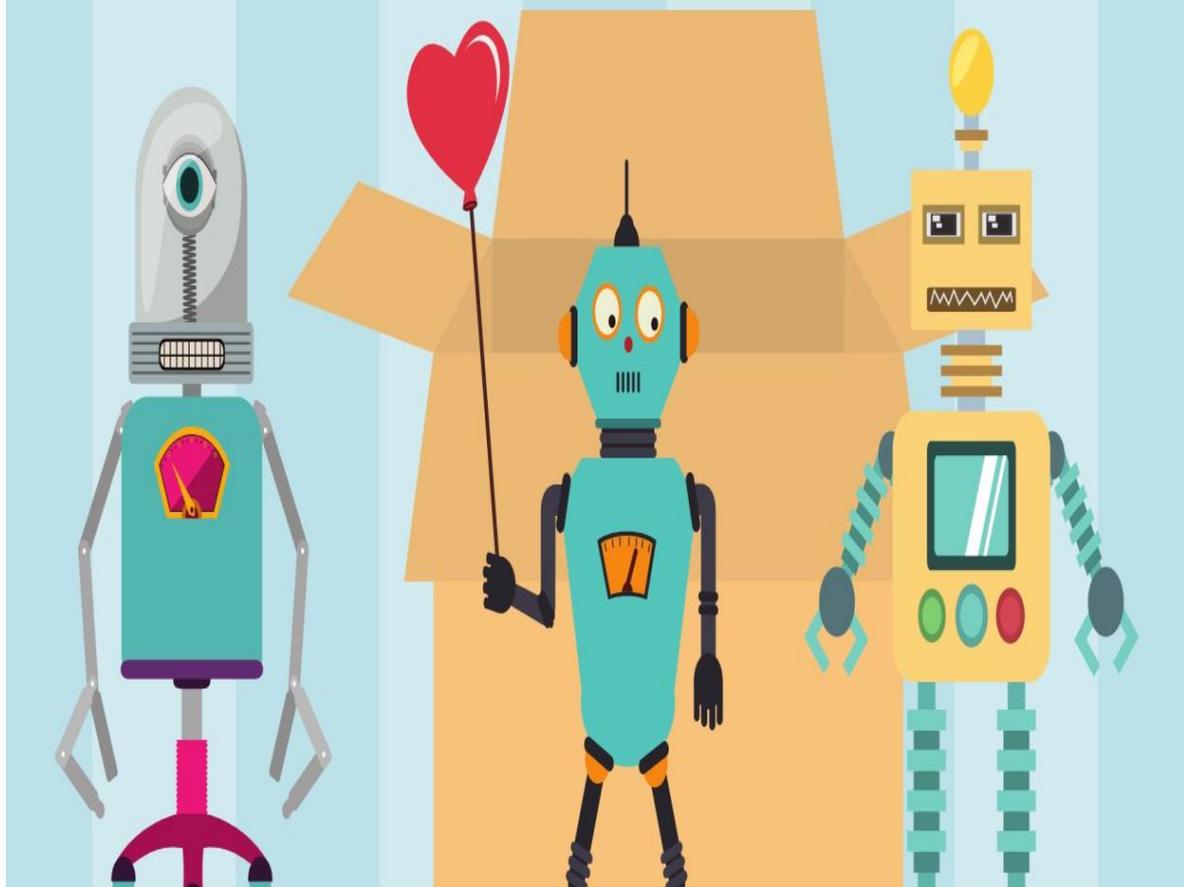
Le :

Présenté par : Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

A TOUT QUI OUT AIMÉES ET QUE JE LES AIMÉES





Grati mayada

Je remercie infiniment mes
papa et maman sans aux je
n'arrive à rien et surtout mon papa
Qui Ma tout donné, aussi que ma
copine feriel qui a été vraiment utile
dans tout les chemins et les circonstances que j'ai
passe.

et son oublier ma famille enseignants tout les profs
out était un exemple favorable, et je cite la mon
encadrante ouaghelent saloua, elle était ma prof et
ma copine sans exception.





Nonari ferel

Tout d'abord je n'oublie jamais tout ce qui m'on aidées
et était pour moi des compagnons vraiment très utiles
je remercie ma famille surtout mes parents de leurs
patience .

son oublier aussi ma deuxième famille enseignante
tout les profs et mes copines
et mes copins et surtout ma copine mayada l
a plus proche dans chaque pat et dans
tout les jours et les années que j'ai passé.
un remerciement dauhors de moi a mon prof
ouaghelent saloua qui a était
pour moi un exemple inoubliable

Abstract

Abstract

In this work, the mathematical analysis of dynamic model of the robot manipulator at 2ddl is carried out. Adaptive PID control has been applied to the manipulator. The adjustable parameters of the PID controller are adjusted by a gradient type adaptation algorithm. This algorithm is selected to minimize a quadratic cost function of the error between an unknown ideal control law and the PID control law used. The stability of the global looped system is proved analytically by the direct method of Lyapunov. The algorithm, implemented in the MATLAB/Simulink environment. The actual and desired signals of the positions and velocities of the joints of the 2-DOF robot are compared. The simulation results clearly demonstrate the effectiveness of the presented approach in terms of trajectory following.

Résumé

Résumé

Dans ce travail, l'analyse mathématique de modèle dynamique du robot manipulateur à 2ddl est effectué. La commande PID adaptative a été appliquée au manipulateur. Les paramètres réglables du contrôleur PID sont ajustés par un algorithme d'adaptation de type gradient. Cet algorithme est sélectionné pour minimiser une fonction de coût quadratique de l'erreur entre une loi de commande idéale inconnue et la loi de commande PID utilisée. La stabilité du système global bouclé est prouvée analytiquement par la méthode directe de Lyapunov. L'algorithme, implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink. Les signaux réels et souhaités des positions et vitesses des articulations du robot 2-DOF sont comparés. Les résultats de simulation démontrent clairement l'efficacité de l'approche présentée en termes de suivi de trajectoire.

Liste des figures

Chapitre 1 ;

Fig 1.1 : Les premiers robots industriels

Fig 1. 2 : Les robots industriels développés entre 1973 et 1974

Fig 1. 3 : Le développement de la robotique entre 1981 et 1984Fig

1.4 : Les robots industriels KuKa, Delta et FlexPicker

Fig1. 5: Les robots industriels RoboLoop, NX100 et l'interface de communicationWiTP

Fig 1.6 : Les robots industriels LVC, LWR et KR AGILUSFig

1.7 : Les composantes d'un robot industriel

Fig1.8 : robot manipulation

Fig 1.9 : Pièces mécanique des robots

fig.1. 10 : architecture des porteurs

fig.1. 11 : Chaines cinématiques (a) sérielle et (b) parallèle.

Chapitre 2 ;

Fig 2.1 : Les robots industriels légers

Fig 2.2 : Les robots industriels à fortes charges

Fig 2. 3 : La Vue éclatée du robot industriel Kuka KR500-2MT

Fig 2.4 : Le schéma cinématique du robot industriel Kuka KR500-2MT

Chapitre 3 ;

Fig 3.1 : Block diagramme de model référence de commande adaptativeFig

3.2 : Schéma de commande adaptative indirecte

Fig 3.3 : Schéma de commande adaptative directe

LES TABLEAUX

Table – La nomenclature du robot industriel Kuka KR500-2MT

Liste des symboles et abréviations

SDNL : systèmes dynamiques non linéaires

l_1 : La longueur du lien 1.

l_2 : La longueur du lien2.

m_1 : La mass du lien 1.

m_2 : La mass du lien 1.

θ_1 : L'angle de rotation de l'articulation 1.

θ_2 : L'angle de rotation de l'articulation 2.

$r_1 = r_2$ La distance à la moitié du lien.

Γ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires

q : Vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : Vecteur représentant les efforts extérieur

m_i : masse du corps i de la chaîne cinématique.

I_{ixx} : moment d'inertie.

I_{ixy} : produit d'inertie.

θ : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaire.

r^+, r^- : représentent respectivement les limites supérieure et inférieure du couple r

r : Vecteur des couples appliqués aux articulations $\in R^n$;

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires $\in R^n$;

Liste des symboles et abréviations

q : Vecteur des positions articulaires $\in R^n$;

K et P représentent respectivement les énergies cinétique et potentielle du système

(q, \dot{q}) L'énergie cinétique

(q) L'énergie potentielle M

M : Matrice d'inertie.

C : Matrice des termes Coriolis, centrifuges et de gravités.

r_f : Couple de frottement.

EC : l'énergie cinétique

EP : l'énergie potentielle

l : la longueur du bras manipulateur

q : position angulaire

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1. Généralité Sur Les Robots Manipulateurs.....	2
introduction	3
Système dynamique non linéaire	4
Robot manipulateur	5
Pièces mécaniques du robot	6
Degrée de liberté et architecture.....	7
Conclusion.....	8
Chapitre 2 . modelisation dynamique des robots manipulateur... ..	9
Introduction	10
Schema cinématique du robot.....	11
La modelisation cinématique du robot.....	12
La modelisation cinématique direct.....	13
Modelisation des robot manipulateur... ..	14
Modelisation cinématique... ..	15
Model dynamique... ..	16
Model d'optimisation dynamique.....	17
Model dynamique inverse	18
Application a manipulateur a un degre de liberte	19
Application a maipulateur a deux degre de liberte.....	20
Conclusion.....	21
Chapitre 3. Commande adaptative du robot manipulateur.....	22
Introduction	23
Les technique du commande (regulateur).....	24
La commande adaptative indirecte... ..	25
La commande adaptative directe... ..	26
Commande adaptative avec modele de reference(MRAC)	27

Commande adaptative a gain preprogrammee - Gain scheduling	28
Conclusion.....	29
Liste des figure	
Les tableaux	

Introduction Générale



Introduction générale

La commande des systèmes est l'un des domaines les plus riches en terme d'algorithmes et d'outils de développement. Au cours des deux dernières décennies, un nombre très important de publications a été consacré au problème de l'analyse et de la synthèse de lois de commande pour les systèmes non linéaires. Ce problème présente beaucoup de challenges parce que les systèmes non linéaires contrairement au cas de systèmes linéaires pour lesquels l'automatique fournit une panoplie de méthodes pour la synthèse de la commande, nedisposent pas d'outils et de méthodes générales pour réaliser cette analyse et/ou synthèse des lois de commande. Ceci est dû au fait que les systèmes non linéaires peuvent posséder des dynamiques complexes et des structures extrêmement variées.

Les robots manipulateurs sont de plus en plus utilisés dans l'industrie au cours des dernières décennies, le contrôle du suivi de trajectoire des manipulateurs avec des paramètres dynamiques inconnus ou variant dans le temps est devenu un domaine de recherche très important. Compte tenu des ces conditions et pour que l'erreur de poursuite ait une convergence globale asymptotique ou exponentielle, les lois de commande classique basées sur hypothèse d'une connaissance complète du modèle dynamique du robot ne peuvent pas être utilisées.

Par conséquent, la nécessité d'un control adaptatif est très importante Dans le langage courant, adapter signifie changer un comportement pour se conformer à des nouvelles circonstances. La commande adaptative est une commande qui peut modifier son comportement vis-à-vis des changements dans la dynamique du processus à commander et des perturbations. Pour ces différents raisons, une estimation en temps réel des paramètres de ce processus est nécessaire pour ajouter les paramètres des régulateurs. [1]

Dans ce travail, une approche de commande PID adaptative pour une classe de systèmes non linéaires est proposée. Un contrôleur PID est utilisé pour approcher en ligne une loi de commande idéale inconnue. La loi d'adaptation, dans ce travail, est sélectionnée pour minimiser par la méthode du gradient un critère quadratique de l'erreur à l'entrée du système,

i.e. de l'erreur entre la commande idéale inconnue et la sortie du contrôleur PID.

Ce mémoire est organisé en une introduction, quatre chapitres et une conclusion :

- Le premier chapitre donne un aperçu général sur les robots : définitions, apparition, application différentes catégorie , les éléments constituants .
- Le deuxième chapitre sera consacré aux modélisations des robots industriels rigides. Les modèles géométriques directs et inverses, les modèles cinématiques directs et inverses et le modèle dynamique directe et inverse.
- Le troisième chapitre traite quelques techniques de commande des robots manipulateurs telle que la commande classique, la commande dynamique, la commande adaptative et en particulier l'algorithme de la commande conçu (Commande PID Adaptative)
- Dans le dernier chapitre, des simulations seront effectuées sur le modèle du robot manipulateur à deux degrés de liberté.

Une conclusion générale donnera une synthèse du travail effectué et résumera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées

Chapitre 1

Généralités Sur Les Robots Manipulateurs



1.1 Introduction

Le terme robot provient du mot slave «robota » qui a comme signification : travail, corvée ou force. Il a été créé par l'écrivain Karel Capek dans les années 20, dans sa pièce de théâtre "Romum's Universal Robots" pour affecter des machines automatiques destinées à remplacer l'homme pour réaliser des tâches complexes, ce qui lui permet d'imaginer une personnalité intelligente créée artificiellement. A l'époque, les gens ne pensaient généralement que le robot

était quelque chose de destructeur et sombre ce qui soulevait de nombreuses questions : sont-ils dangereux ? Comment pouvons-nous les utiliser ?

1.2. Les étapes de développement des robot



Le premier robot industriel

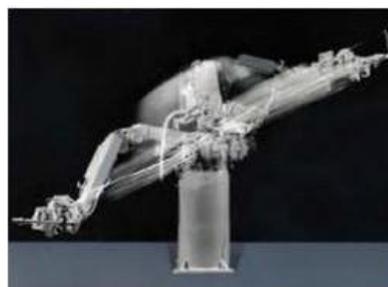


Versatran

Fig 1.1 : Les premiers robots industriels [6]



KUKA (Famulus)



IRB 6



Fig 1. 2 :Les robots industriels développés entre 1973 et 1974 [6]



Fig 1. 3 : Le développement de la robotique entre 1981 et 1984 [6]

Le premier robot pour des applications d'emballage a été créé En 1992, le robot Delta.

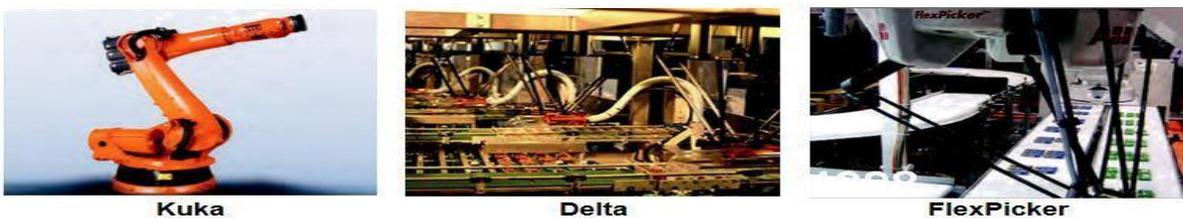


Fig 1.4 : Les robots industriels KuKa, Delta et FlexPicker [6]

C'était le robot de picking le plus rapide du monde, le système de " RoboLoop " a été lancé en Suisse par Güdel. Il permet à des robo-transporteurs de suivre des voies et de circuler dans des boucles fermées, ce qui a créé des nouvelles possibilités pour l'automatisation d'usine. Les systèmes de contrôle du robot ont également des développements continus avec l'évolution de la robotique.



Fig1. 5: Les robots industriels RoboLoop, NX100 et l'interface de communication WiTP [6]

la société allemande KuKa, a lancé une nouvelle série de robots KR AGILUS. Avec la série KRAGILUS, Kuka établit une gamme complète de petits robots. En effet, leurs performances sont originales dans cette catégorie de charge utile, des temps de cycle courts, des vitesses très élevées, un système d'alimentation d'énergie intégré, et cela dans toutes les

positions où il est installé au sol ,il permet de simplifier absolument la coopération efficace entre les humains et les machines. Ce qui Déclenche un concept d'automatisation totalement nouveau[7].



Fig 1.6 :Les robots industriels LVC, LWR et KR AGILUS [6] et [7]

Le robot est en position contrôlée, reprogrammable, multifonctionnel, Plusieurs degrés de liberté pour manipuler les matériaux, les pièces, les outils et Équipement dédié, variable pendant le mouvement et programmé pour l'exécution Diverses tâches. Il a généralement l'apparence d'un ou plusieurs bras, avec Poignet. Son unité de contrôle utilise, entre autres,des dispositifs de stockage et Il peut s'agir de la perception et de l'adaptation au milieu et à l'environnement. Ceux-là Les machines polyvalentes sont généralement conçues pour remplir la même fonction dans la même machine Boucles adaptables à d'autres fonctions sans modification permanente Matériel .

1.4 Pièces mécaniques du robot

Un robot de manipulation est constitue de sous-composants distincts : un ou plusieurs Dispositifs terminaux et une structure mécanique.

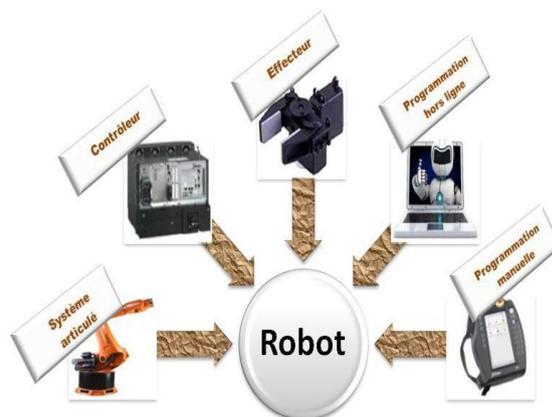


Fig 1.7 : Les composantes d'un robot industriel.

Le rôle de la structure mécanique articulée est d'amener le corps terminal dans un état donné en fonction des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Sa structure est le corps d'une chaîne cinématique, généralement rigide ou supposée l'être, assemblée par des maillons appelés articulations.

La programmation est l'élément principal qui différencie un automate d'un robot. Elle consiste à indiquer les mouvements à réaliser par le robot.

La conception et le contrôle du robot nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques tels que : Modèles géométriques avant et arrière exprimant les emplacements des organes Le terminal dépend des variables articulaires du robot et vice versa.

Le bras manipulateur est un système de positionnement. Pour contrôler cette position, les propriétés dynamiques de ce bras doivent être connues. Vu le nombre de degrés de liberté qui peut avoir lieu, la détermination de ces propriétés dynamiques n'est pas un processus facile [2].

1.2 Système dynamique non linéaire

Un système dynamique, c'est un espace de phase, l'espace des états possibles du système considéré, l'équation d'évolution qui décrit la variation temporelle de l'état du système se présente aussi comme une application de l'espace de phases dans lui-même, lorsqu'on préfère traiter le temps comme une variable discrète.

Les systèmes dynamiques sont linéaires et non linéaires, et la plus part des systèmes dynamiques sont non linéaires, Dans SDNL (systèmes dynamiques non linéaires) l'évolution de chacun des constituants dépend en général de celle de plusieurs autres constituants, et l'étude des SDNL a en revanche pour objet de décrire les changements dans le temps et l'espace (transformations) de l'état des système en fonction des causes de ces changements dans la mesure où ces causes sont justement les interactions entre les objets du système (causes internes).

On résout mathématiquement un système dynamique si l'on peut retracer l'évolution de chaque variable en fonction du temps (ce qui s'appelle intégrer les équations

différentielles). Très souvent, le système évolue au cours du temps vers sa solution, où les valeurs des variables ne changent plus. Cela peut signifier que le système a atteint un équilibre et ne bouge plus (comme le pendule arrivé en bout de course), mais cela signifie le plus souvent que toutes les transformations se compensent comme la célèbre baignoire qui se remplit à la même vitesse qu'elle se vide et dont le volume d'eau reste constant.



Fig1.8 : robot manipulation

Le robot industriel se compose d'un robot manipulateur, d'une alimentation électrique et d'un contrôleur. Le manipulateur se divise à son tour et selon la fonction : le bras et le corps du robot.

Un robot manipulateur de machine dont le mécanisme est composé d'une série de segments, articulés ou télescopiques, vise à prendre et poser des objets et peut être guidé à la fois par un opérateur et par un système. Le manipulateur est similaire à un bras qui peut déplacer automatiquement des objets dans un espace défini. Chaque manipulateur comprend un contrôleur et un bras manipulateur ; ses performances dépendent de Vitesse, Poids de charge utile, Précision.

Le mécanisme : ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il permet de remplacer ou de prolonger son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles autonomes). Sa motorisation est réalisée par des actionnaires électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés [2].

1.1. Degrés de liberté et architecture

Un robot non redondant doit disposer de six degrés de liberté pour positionner et orienter un solide quelconque dans l'espace [3]. La plupart des robots sériels ont leurs actionneurs à chaque articulation, ce qui augmente de beaucoup la masse à supporter par chaque membre.

Un autre type d'architecture permet de contrer les mauvaises performances des robots sériels : les mécanismes parallèles. Comme leur nom l'indique, l'organe terminal de ces mécanismes est relié à la base par plus d'un membre, il permet d'augmenter le ratio charge/poids car le poids est reparti entre chaque patte.

Les degrés de liberté représentent la quantité d'informations fournies par les données que vous pouvez ou consommez pour estimer les valeurs des paramètres de population inconnus et calculer la variabilité de ces estimations.

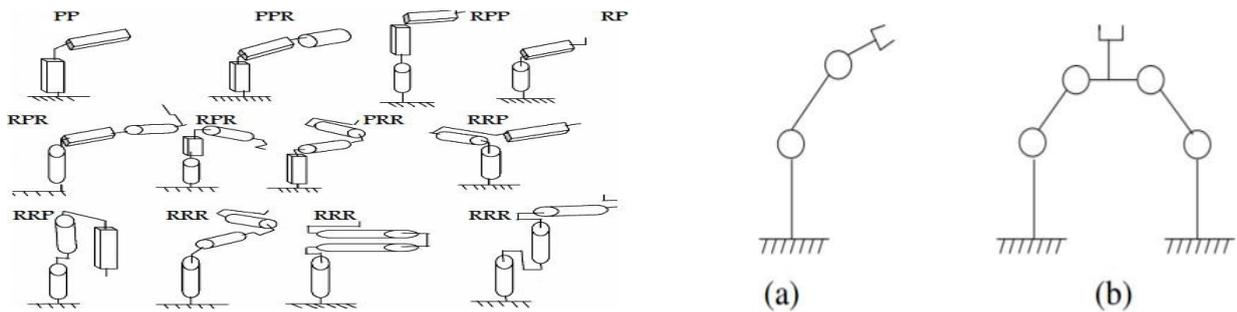


fig.1. 10 : architecture des porteurs fig.1. 11 : Chaînes cinématiques (a) sérielle et (b) parallèle.

Un robot est redondant lorsque le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulations motorisées. Cette propriété permet d'augmenter le volume du domaine accessible et de préserver les capacités de déplacement de l'organe terminal en présence d'obstacles le ou les degrés de liberté supplémentaires autorisant leur contournement.

1.2. Conclusion

Nous nous sommes concentrés dans ce chapitre sur les robots manipulateurs en général, les étapes de développement du robot et les différents types de robots et leur différente caractéristique, le manipulateur est l'objet de notre étude.

Chapitre 2

Modélisation Dynamique Des Robots Manipulateurs



2.1 -Introduction :

Le modèle dynamique d'un robot manipulateur est un ensemble de formulations mathématiques constituées par des équations de mouvement de ce robot. Celles-ci sont exprimées par un système d'équations différentielles décrivant le comportement dynamique du robot manipulateur. Pour construire ce système, nous devons tout d'abord faire une description géométrique du robot manipulateur à chaîne ouverte simple qui est introduite en utilisant les notations de Denavit-Hartenberg [2], [4], [5]. Cette description est une représentation matricielle des changements de repères consécutifs.

Il existe plusieurs méthodes et procédures pour obtenir le modèle dynamique d'un robot manipulateur. Parmi lesquelles nous pouvons citer le formalisme de Newton-Euler et le formalisme de Lagrange [5]. Dans notre travail, nous mettons en œuvre le formalisme de Lagrange est le plus adapté pour le calcul du modèle dynamique direct, il est souvent employé pour la modélisation et la simulation du système.

Pour les robots industriels de grandes dimensions où son objectif principal est le positionnement précis d'un outillage ou d'une pièce, la rigidité peut conditionner des erreurs de manipulation liées éventuellement aux chargements externes élevés [19]. Les modèles d'un robot industriel flexible ont été largement étudiés dans les ouvrages de [20] et [18]



Barrett WAM



Bras ASSIST



Kuka-DLR LWR

Fig 2.1 : Les robots industriels légers

Les opérations qui nécessitent des efforts et des couples importants exigent l'utilisation de robots industriels à fortes charges. Ce type de robot est généralement considéré comme rigide ce qui justifie son utilisation pour les procédés complexes comme celui étudié dans ce travail de recherche.



Fig 2.2 :Les robots industriels à fortes charges

2.3 -Schéma cinématique du robot

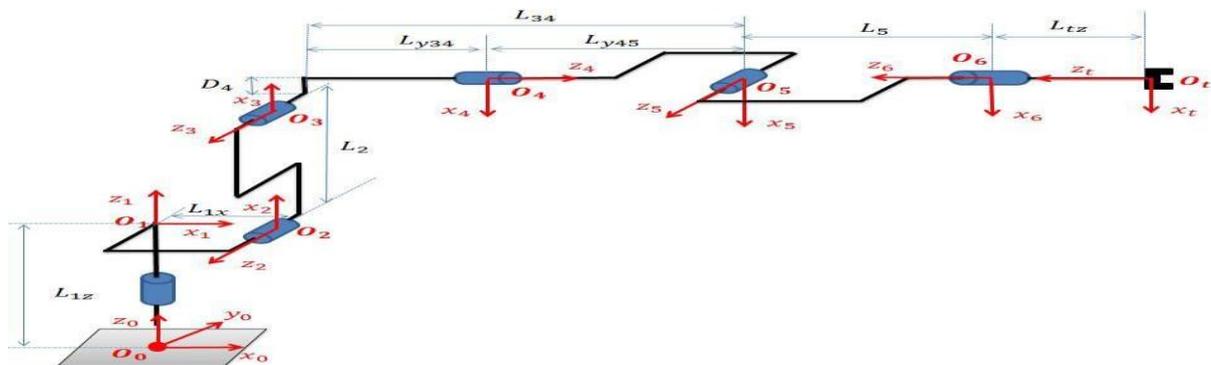


Fig 2.3 : Le schéma cinématique du robot industriel Kuka KR500-2MT

2.4. Modélisation des robots manipulateurs

Pour commander un robot où pour simuler son comportement on doit disposer des modèles. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. L'obtention de ses différents modèles n'est pas aisée, la difficulté variant selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Entrent en ligne de compte le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée.

Ces modèles, qu'ils soient utilisés en simulation ou en commande, doivent représenter le comportement géométrique, cinématique ou dynamique du robot de façon réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des procédures efficaces d'identification de leurs paramètres constitutifs. Pour qu'une commande puisse effectivement être implantée sur un contrôleur de robot, les modèles doivent être calculés en ligne et donc, le nombre d'opérations à effectuer doit être minimum. Les techniques proposées ont été développées dans ce souci et conduisent aux modèles les plus performants.

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que : les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). On distingue :

- ✓ les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.
- ✓ les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.
- ✓ les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

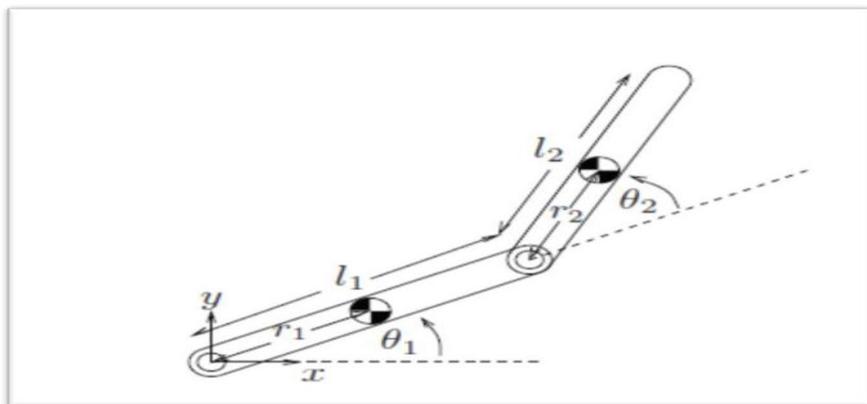


Fig.2.4 : Bras à deux degré de liberté (2ddl)

Considérons le robot à deux articulations avec les spécifications suivantes en coordonnées Oxy:

l_1 :1 m est la longueur du lien 1.

l_2 :1 m est la longueur du lien2.

m_1 :1 Kg est la mass du lien 1.

m_2 :1 Kg est la mass du lien 1.

θ_1 : Est l'angle de rotation de l'articulation 1.

θ_2 : Est l'angle de rotation de l'articulation 2.

$r_1 = r_2$:0,5 m est la distance à la moitié du lien.

2.5.Modélisation Cinématique

La cinématique complète la modélisation géométrique en établissant les relations entre les vitesses des paramètres articulation (\mathbf{q}) et les vitesses des variables articulation .ces relations sont désignées par la notation $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{q}}$ ou \mathbf{j} est une matrice qui dépend de la configuration du SMA. La propriété évidente du modèle cinématique est sa linéarité par rapport aux vitesses.il est donc a priori plus aisée à manipuler que le modèle géométrique.

2.5.1. Modélisation cinématique directe (MCD)

La solution du modèle cinématique direct (MCD) correspond aux vitesses angulaires et linaires de l'organe terminal attaché au robot. Ces vitesses sont exprimées en fonction des vitesses articulaire \dot{q}_i et des positions articulaire , ainsi que des paramètres géométriques du robot. Le modèle cinématique direct d'un robot poly-articulé rigide est définie par l'expression suivante :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}_t(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

OU :

$$\dot{\mathbf{X}} = [\dot{V}_x; \dot{V}_y; \dot{V}_z; \dot{A}; \dot{B}; \dot{C}]^T$$

\dot{X} Est un vecteur à 6 coordonnées, il décrit à quelle vitesse l'outil monté sur le robot, avance et tourne. En effet, ce vecteur contient à la fois les vitesses linéaires de l'outil selon les trois axes : V_x , V_y et V_z , ainsi que ses vitesses angulaires autour des trois axes \dot{A} , \dot{B} et \dot{C} , qui sont tous exprimés dans le repère R_i , qui peut être un repère lié à n'importe quel élément du robot.

Le modèle cinématique directe d'un robot manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles (\dot{X}), en fonction des vitesses articulaires (\dot{q}). Il est noté :

$$\dot{X} = J \cdot \dot{q}$$

ou: J désigne la matrice jacobienne de dimension (m x n).

2.5.2. Modélisation cinématique inverse (MCI)

Le modèle dynamique inverse exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations. Les formalismes les plus utilisés pour le calcul du modèle dynamique inverse sont [3] :

- Formalisme de Lagrange.
- Formalisme de Newton-Euler.

L'objectif du modèle cinématique inverse d'un robot manipulateur, sont de calculer les vitesses des coordonnées articulaires (\dot{q}), en fonction des vitesses opérationnelles (\dot{X}).

Il est noté :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X}$$

2.6. Modèle dynamique

Le modèle dynamique est la relation entre les couples et/ou forces appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations. Le modèle dynamique est présenté par une relation de la forme :

$$\Gamma = (q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (1.1)$$

Avec :

τ : Vecteurs des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique (dans la suite en écrira tout simplement couple).

q : Vecteur des positions articulaires. \dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : Vecteur représentant les efforts extérieurs (forces et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

2.6.1. Modèle dynamique direct

Le modèle dynamique direct exprime la position, la vitesse et l'accélération des articulations en fonction du couple appliqué [3]. Il est obtenu par inversion du modèle. Avant de décrire les relations géométriques entre les différents corps du robot, on définit les notions suivantes [4] :

• Degré de liberté : nombre de paramètres utilisés pour spécifier la configuration d'un élément de la chaîne cinématique par rapport à un autre.

• Degré de mobilité : toute articulation est caractérisée par son degré de mobilité m ,

C'est-à-dire le nombre de degrés de liberté entre deux corps successifs de la chaîne cinématique ($0 \leq m \leq 6$)

• Espace articulaire : représente l'état des corps composant le robot en fonction des

Variables articulaires, sa dimension n est égale au nombre de degrés de liberté du robot.

• Espace opérationnel : décrit la position et l'orientation de l'organe terminal du robot par rapport à un repère de référence, sa dimension $m \leq 6$.

2.6.2. Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations. Le modèle dynamique inverse est représenté par une relation de la forme :

$$\Gamma = (\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (I. 2)$$

τ : Vecteur des couple/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique.

θ : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaire.

Plusieurs formalismes ont été utilisés pour obtenir le modèle dynamique des robots. Les formalismes les plus souvent utilisés sont:

- ✓ Le formalisme de Lagrange-Euler : cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en simulation.
- ✓ Le formalisme de Newton-Euler cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en commande.

Nous allons voir dans ce que suit la modélisation d'un bras manipulateur dynamique rigide, à chaîne ouverte simple, à deux degré de liberté et en tenant compte des effets de la vitesse, on va utiliser le formalisme de Lagrange pour déterminer les équations du mouvement.

2.6.3 - Le formalisme de Lagrange

Plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir le modèle dynamique inverse [4], [5]. Nous citent la formulation de Newton-Euler et la formulation de Lagrange-Euler. Nous utilisons la formulation de Lagrange-Euler parce qu'elle est simple et systématique et décrit le modèle dynamique du système en termes de travail et d'énergie en utilisant les coordonnées généralisées.

La forme générale représentant le mouvement d'un robot manipulateur constitue de n degrés de liberté et de n articulations, s'écrit suivant Lagrange [44] :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau \quad (1)$$

L : Fonction lagrangienne de robot égale à : $L = K - P$

K : Energie cinétique totale du robot manipulateur.

P : Energie potentielle totale du robot manipulateur.

$q \in R$: Vecteur des positions articulaires.

$\dot{q} \in R$: Vecteur des vitesses articulaires.

2.8 - Application un manipulateur à deux degré de liberté

Dans notre travail, nous avons considéré un robot manipulateur à 2ddl, dont le mouvement des articulations est rotoïde, nous avons donc $q_i = \theta_i$

Tel que :

$$q = [\theta_1 \quad \theta_2]$$

A partir de la figure (2.4), nous déterminons les coordonnées du bras manipulateur par rapport au repère x y, ce qui donne :

$$\begin{cases} x_1 = l_1 \cos(\theta_1) \\ y_1 = l_1 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -l_1 \dot{\theta} \sin(\theta_1) \\ \dot{y}_1 = l_1 \dot{\theta} \cos(\theta_1) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \dot{x}_1^2 = l_1^2 \dot{\theta}^2 \sin(\theta_1)^2 \\ \dot{y}_1^2 = l_1^2 \dot{\theta}^2 \cos(\theta_1)^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = \dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 \sin(\theta_1)^2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)^2 + 2\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 \cos(\theta_1)^2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 \cos(\theta_1 + \theta_2)^2 + 2\dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (6)$$

➤ **Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p bras 1**

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ P_1 = m_1 g l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (7)$$

➤ **Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p bras 2**

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{x}_2 = -\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = \dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (8)$$

Avec :

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \quad (9)$$

$$v_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 + 2l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \\ K_2 = \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ P_2 = m_2 g y_2 = m_2 g [l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \end{cases} \quad (11)$$

➤ Détermination du Lagrangien $L = Ec - Ep$

$$L = K - P = K_1 + K_2 - (P_1 + P_2) \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 - m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (I.15)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (14)$$

Ce qui donne :

$$\tau_1 = [(m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (I.18)$$

$$\tau_2 = [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (15)$$

Alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2 m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix}}_{M(\theta)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 (2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}}_{C(\theta, \dot{\theta})} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}}_{G(\theta)} \end{aligned} \quad (16)$$

L'expression du couple peut être s'exprimer sous la forme matricielle suivante, ce qui correspondant au modèle dynamique du robot :

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) \quad (17)$$

Avec :

τ : Vecteur des couples ou des forces généralisés.

θ : Vecteur des variables articulaires du bras manipulateur.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaires.

$M(\theta)$: Matrice d'inertie de dimension $(n \times n)$.

$C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta}$: Vecteur des forces centrifuges et de Coriolis.

$G(\theta)$: Vecteur de force de gravité de la charge.

2.9- Conclusion

Nous avons exposé la modélisation des robots manipulateurs, le modèle cinématique directe et inverse, le modèle dynamique et le modèle dynamique inverse.

Le modèle dynamique peut être effectué soit par la méthode de Newton-Euler ou par celle de Lagrange. La première nécessite moins de calcul, elle est destinée pour des applications en temps réel. Tandis que la deuxième s'avère intéressante pour la simulation, et application du un et deux degré.

Chapitre 3

commande adaptative d'un robot manipulateur



3.1- Introduction

La commande adaptative signifie adapter le système de commande afin que le comportement de la commande soit conforme aux circonstances nouvelles ou changées". Les mots systèmes adaptatifs et contrôle adaptatif ont été utilisés dès 1950. La commande adaptative est composée d'un estimateur de paramètres, qui génère des estimations de paramètres en ligne, avec une loi de commande pour commander le système dont la classe et les paramètres sont généralement inconnus. Le choix de l'estimateur de paramètres, le choix de la loi de contrôle et la manière dont ils sont combinés conduisent à différents types de commande adaptative. La commande adaptative que nous abordons ici et aussi appelée commande adaptative

Identifiée (basée sur un identificateur) car il existe d'autres types de commande adaptative non identifiée où la commande des systèmes est réalisée sans l'utilisation d'un estimateur de paramètres en ligne. Dans ce cours nous allons étudier la classe de commande adaptative identifiée. La structure de la commande adaptative est composée d'une boucle de rétroaction et d'un régulateur à gains réglables,

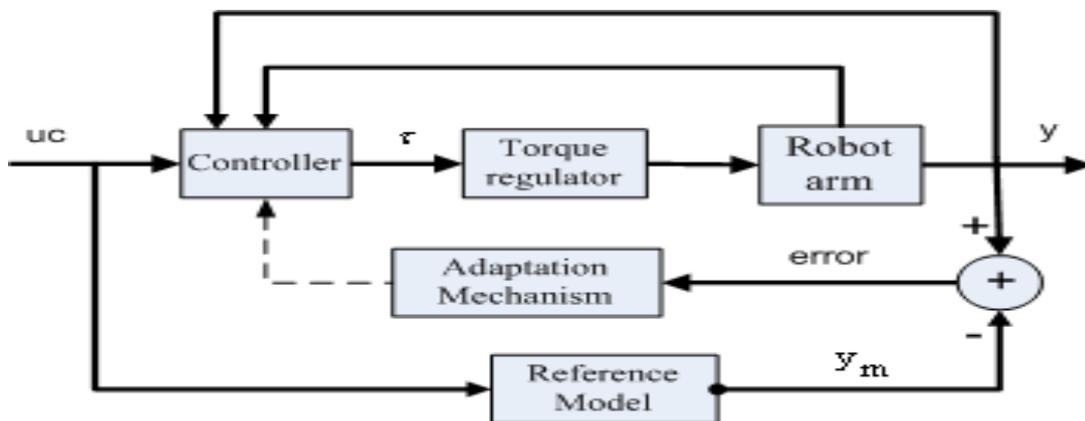


Fig 3.1 : Block diagramme de model référence de commande adaptative

3.2 - Les techniques de commande (régulation)

On appelle régulateur ou (contrôleur) la partie d'un système de commande comparant le Signal de mesure $y(t)$ avec le signal de consigne $r(t)$ afin de générer un signal de commande $u(t)$.

Les régulateurs classiques : les régulateurs classiques sont constitués d'une seule variable d'entrée et d'une seule variable de sortie, exemple : les contrôleurs PI.

Régulateurs avancées : les régulateurs de type avancé ou dits de méthode sont constitués de plusieurs variables d'entrée et de plusieurs variables de sortie [23].

Régulateur PID

Le régulateur PID appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. Ce régulateur injecte à partir de signal d'erreur $\mathcal{E}(t)$ une commande $XC(t)$, il est inséré dans

La chaîne directe d'asservissement, [24] sa fonction de transfert est:

$$C(P) = K_p + \frac{1}{PT_i} + T_d p$$

La façon dont l'estimateur de paramètres, est combinée avec la loi de commande donne lieu à deux approches différentes:

3.3- La commande adaptative indirecte

La commande adaptative indirecte avec identification du modèle (MIAC), encore appelée commande auto-ajustable ou adaptation hors ligne, Dans cette approche le calcul des paramètres du régulateur passe par l'estimation en temps réel des paramètres du processus à commander.

La commande adaptative indirecte est un concept naturel : un contrôleur est mis à jour en temps réel en fonction de l'estimation des paramètres du système, les paramètres du système à commander sont estimés en ligne et utilisés pour calculer les paramètres du régulateur. A chaque instant t (période d'échantillonnage), le système estimé est formé et traité comme si elle était le véritable système à commander (à partir duquel on fait le calcul des paramètres du régulateur). Cette approche est appelée aussi commande adaptative explicite.

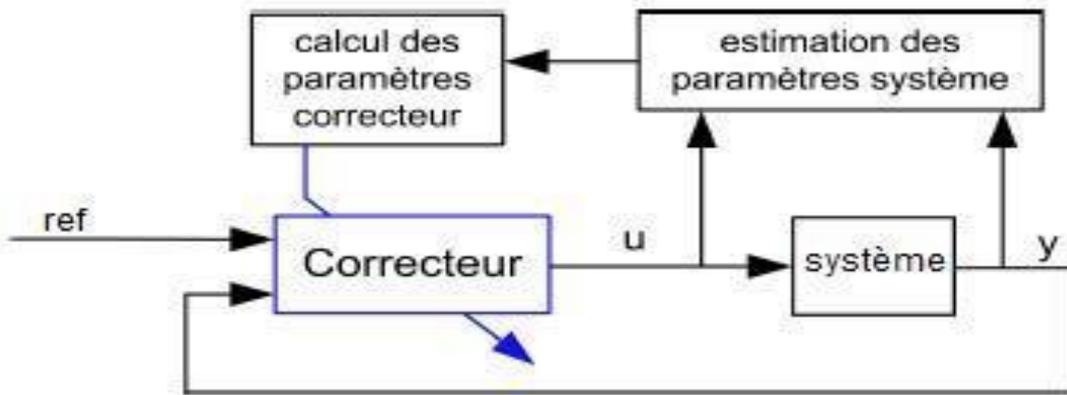


Fig 3.2 : Schéma de commande adaptative indirecte

3.4 - Commande adaptatif directe

La commande adaptative directe à modèle de référence (MRAC), encore appelée l'adaptation En ligne Dans cette approche le processus à commander n'est pas identifié, et les paramètres du régulateur sont estimés directement selon une structure imposée par le concepteur.

Commande adaptatif directe, le système d'identification est paramétré en fonction des paramètres du régulateur souhaité, qui sont estimés directement (sans calculs intermédiaires impliquant des estimations de paramètres du système dynamique). Cette approche est appelée aussi commande adaptative implicite.

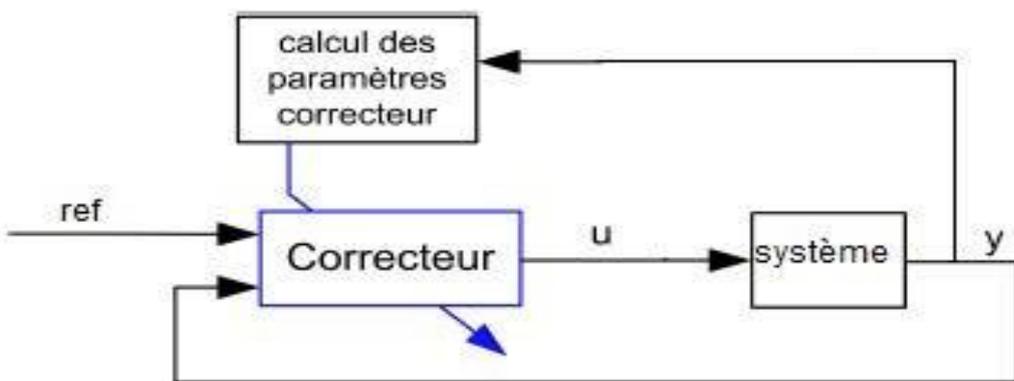


Fig 3.3 : Schéma de commande adaptative directe

Le contrôle adaptatif indirect peut être appliqué à une plus grande classe de plantes avec différentes structures de régulateur, mais il souffre d'un problème connu sous le nom de problème de stabilisation: Les paramètres du régulateur sont calculés à chaque instant t en fonction d système d'identification. De tels calculs sont possibles, à condition que le système

estimé soit contrôlable et observable. Dans le cas de système à phase minimale, d'autres schémas plus complexes de commande adaptative ont été élaborés. Dans le cas de commande adaptative non identifiée l'estimateur de paramètres en ligne est remplacé par des méthodes de calcul pour trouver les paramètres du régulateur.

3.5- Commande adaptative avec modèle de référence (MRAC)

C'est l'une des approches de la commande adaptative les plus utilisées, dans laquelle les performances désirées sont spécifiées par le choix d'un modèle de référence [25]. Cette Approche

a

été développée par Whitaker et ses collègues en 1958 [26]. Le système adaptatif à Modèle de référence (SAMR), est une manière pratique d'imposer des spécifications au Système de commande.

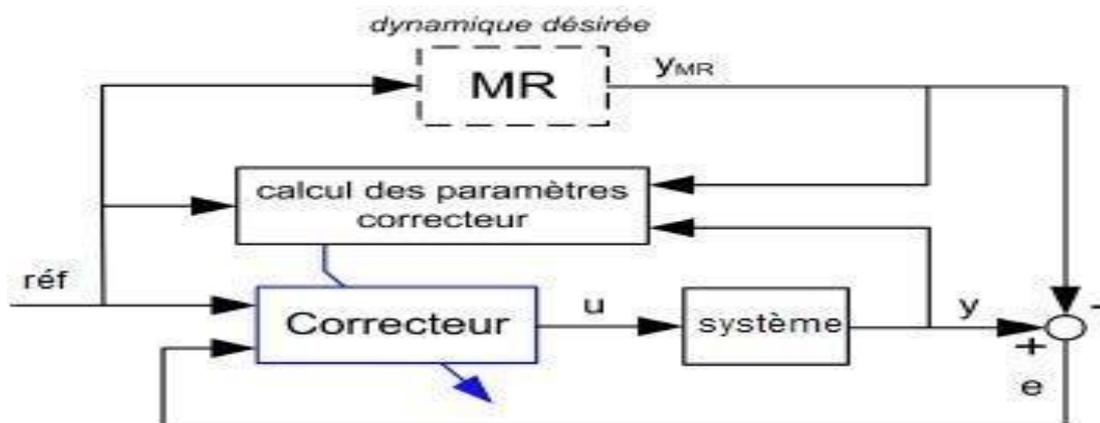


Fig 3.4 : Schéma de commande adaptative directe avec modèle de référence

3.6 La commande adaptative a gain préprogrammée - Gain Scheduling

La commande adaptative à gain préprogrammée consiste en une table de traitement et une logique appropriée pour détecter le point de fonctionnement et choisir la valeur correspondante des gains du régulateur ζ partir de la table de traitement. Avec cette approche, les variations des paramètres du système peuvent être compensées en modifiant les gains du régulateur en fonction des mesures d'entrée, et sortie et mesures auxiliaires. L'avantage de la programmation du gain est que les gains du régulateur peuvent être modifiés aussi rapidement que les mesures répondent aux changements de paramètres. Cependant, des changements fréquents et rapides des gains du régulateur peuvent entraîner une instabilité; par conséquent, il y a une limite à la fréquence et à la rapidité avec laquelle le régulateur peut être modifié.

Le choix du contrôle adaptatif comme solution à un problème de contrôle particulier implique la compréhension des propriétés de l'installation ainsi que des exigences de performance.

3.7 -Techniques de commande des robots

Dans le cas où le modèle exact du robot est parfaitement connu, plusieurs stratégies de commande peuvent être appliquées. Cependant, en pratique, cette condition idéale n'est jamais tout à fait remplie en raison des différentes perturbations agissant sur les robots manipulateurs, et des incertitudes du modèle, d'où la nécessité d'adapter la commande.

Différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. La conception mécanique du bras manipulateur a une influence sur le choix de schéma de commande. Un robot manipulateur est une structure mécanique complexe dont les inerties par rapport aux axes des articulateurs varient non seulement en fonction de la charge, mais aussi en fonction de la charge, mais aussi en fonction de la configuration des vitesses et des accélérations. Parmi les commandes des robots manipulateurs, les plus utilisées dans les applications industrielles sont :

- Commande classique
- Commande dynamique
- Commande adaptative

3.7.1. Commande classique

La commande classique est l'ensemble des lois linéaires de type PID (proportionnel intégral dérivé) à gains constants, et le régulateur standard (PID) est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Pour élaborer une commande PID, il faut considérer chaque articulation du robot comme un mécanisme indépendant et pouvant être linéarisé dans une zone de fonctionnement.

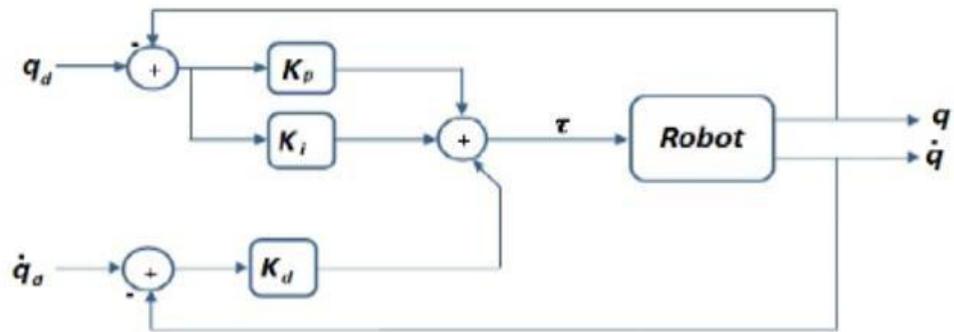


Fig 3.5: Schéma classique d'une commande PID

La loi de commande à choisir est du type PD :

$$\tau = K_p(q_d - q) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_I \int (q_d - q) dt \quad (1)$$

:Position désirée .

:Position réelle.

\dot{q}_d : Vitesse désirée.

\dot{q} : Vitesse réelle.

K_p, K_D, K_I : matrices diagonales ($n \times n$) diagonales et positives

En robotique, la pratique la plus courante consiste à choisir les gains de manière à obtenir comme pôles dominants un pôle double réel négatif, dans le but d'obtenir une réponse sans oscillations et rapide, l'autre pôle est choisi réel négatif mais loin des deux autres.

Les commandes de type PID sont implantées dans tous les contrôleurs de robots industriels actuels. Le système est considéré comme un système linéaire et chacune de ses articulations est asservie par une commande décentralisée de type PID à gains constants.

3.7.2. Commande dynamique

Ce type de commande est aussi connu sous le nom de commande par découplage non linéaire ou couple calculé. La commande par découplage non linéaire « commande dynamique » est un asservissement non linéaire dont les paramètres utilisent un modèle de la dynamique du robot, la mise en œuvre de cette méthode exige le calcul en ligne du modèle dynamique et la connaissance des valeurs numériques des paramètres inertiels et de frottements ce qui ne constitue plus maintenant une limite rédhibitoire grâce aux évolutions technologiques en micro-informatique et le développement de techniques d'identification.

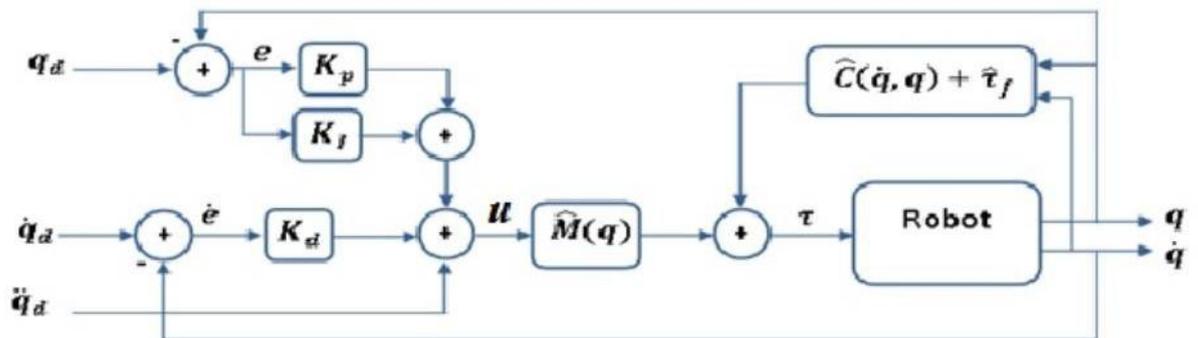


Fig.3.6: Schéma d'une commande dynamique par découplage non-

L'équation de la loi de commande sera donné par :

$$\tau = \widehat{M}(q)u + \widehat{c}(q, \dot{q}) + \widehat{\tau}_f \quad (1)$$

Avec \widehat{M} , \widehat{C} , $\widehat{\tau}_f$ estimé de M , C , τ_f ,

- M : Matrice d'inertie.
- C : Matrice des termes Coriolis, centrifuges et de gravités.
- τ_f : Couple de frottement.

Où : $u = \ddot{q}_d + K_P(q_d - q) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_I \int_0^t (q_d - q) dt$ (2)

Le bon choix des constantes K_P , K_D et K_I fait tendre asymptotiquement l'erreur vers zéro.

3.7.3. Commande adaptative

L'utilisation de la commande adaptative a commencé au début des années 80 en parallèle avec une rapide évolution en micro-électronique qui permet d'implémenter des régulateurs adaptatifs sur des systèmes à microprocesseurs.

La commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs des boucles de commande afin de réaliser ou maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé à commander sont soit inconnus soit variantes dans le temps.

En principe, un système de commande adaptative mesure un certain indice de performance du système à commander à partir de l'écart entre l'indice de performance désiré et l'indice de performance mesuré. Le mécanisme d'adaptation commande certains paramètres du système ajustable ou introduit un signal supplémentaire de commande d'après une certaine stratégie afin de minimiser l'indice de performance. La figure (2-3) représente le principe général d'un système dans une plage donnée de commande adaptative.

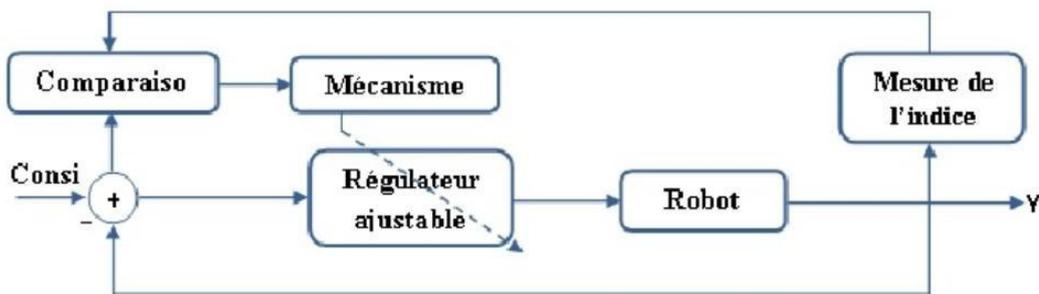


Fig.3.7: Principe des systèmes de commande adaptative

La Commande PID adaptative

Dans ce travail, un contrôleur PID adaptatif sera utilisé. Les trois gains de ce contrôleur PID : K_P , K_I et K_D seront considérés comme les paramètres réglables. Pour ce faire, un mécanisme d'adaptation sera développé pour minimiser un critère quadratique de l'erreur entre la commande idéale inconnue u^* et la commande fournie, issue du contrôleur PID [45]

Nous considérons la classe des systèmes non linéaires décrits par

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dots, \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

Ou, encore

$$y^{(n)} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

Avec $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état supposé mesurable, $y \in \mathbb{R}$ est la sortie du système, $u \in \mathbb{R}$ est l'entrée de commande, $f(x)$ et $g(x)$ sont des fonctions non linéaires supposées inconnues. Le gain de commande $g(x)$ est supposé non nul, borné et de signe connu. $g(x)$ est donc soit strictement positif, soit strictement négatif. Sans perte de généralité, nous supposons $0 < g(x) < g$. Notons que le résultat de ce papier peut être facilement adapté au cas $g(x) < 0$.

Pour atteindre l'objectif de commande, on définit l'erreur de poursuite par

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad (3)$$

L'erreur filtrée donnée par

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \gamma\right)^n e(t), \quad \gamma > 0 \quad (4)$$

$s(t) = 0$ est une équation différentielle qui possède la solution $e(t) = 0$. De plus, si $s(t) \leq \Phi$ avec Φ une constante positive, l'erreur de poursuite et ses dérivées vérifient [1],

$$|e^{(i)}(t)| \leq 2^i \gamma^{i-n+1} \Phi, \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

La dérivée temporelle de l'erreur filtrée (4) peut être

écrite sous la forme

$$\dot{s} = v - f(x) - g(x)u$$

Avec

$$v = y_d^{(n)} + k_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + k_1\dot{e}$$

Et

$$k_j = c_{n-1}^{j-1} \gamma^{n-j}$$

A. La loi de commande

La loi de commande idéale est alors approchée par une commande PID de la forme [45]

$$u = K_{pid} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \dot{e}(t) \quad (4)$$

où K_p est le gain proportionnel, K_i le gain intégral et K_d le gain de dérivation.

$$u_{pid} = \pi^T e(t) \theta \quad (5)$$

$$\pi(e) = [e(t), \int e(t) dt, \dot{e}(t)]^T$$

θ est le vecteur des paramètres ajustés durant la commande, qui est défini par

$$\theta = [K_p, K_i \text{ et } K_d]^T, e \text{ est l'erreur de poursuite.}$$

B. La loi d'adaptation paramétrique

La loi de commande étant choisie, il nous reste alors à déterminer la loi de mise à jour des paramètres réglables θ . [45]

$$u^* = \pi^T e(t) \theta^* \quad (6)$$

$$\dot{s} = -\alpha s - \beta \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + g(x)(u^* - u) \Leftrightarrow$$

$$\dot{s} = -\alpha s - \beta \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + g(x) \prod^T e(t) \check{\theta} \quad (7)$$

Avec $\check{\theta} = \theta^* - \theta$

la loi de mise à jour des paramètres θ est à sélectionner pour minimiser l'erreur à l'entrée du système $u e$ définie par

$$e_u = u^* - u_{pid} = \prod^T e(t) \check{\theta} \quad (8)$$

$$g(x)e_u = \dot{s} + \alpha s - \beta \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) \quad (8)$$

3.7- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un schéma de commande PID adaptative pour les systèmes non linéaires. Le schéma est composé d'une loi de commande PID avec sa loi d'adaptation. un contrôleur PID est utilisé pour approcher en ligne une commande idéale inconnue, et la loi de mise à jour des paramètres réglables du contrôleur PID est sélectionnée afin de minimiser l'erreur à l'entrée du système, i.e. pour minimiser une fonction quadratique de l'erreur entre la commande idéale inconnue et la sortie du contrôleur PID qui représente le signal de commande.

Les résultats de la simulation effectuée sur un robot manipulateur à 2ddl permettent d'illustrer l'analyse théorique.

Chapitre 4

Simulations



Les résultats de simulation

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats de la méthode adoptée pour réaliser la commande du bras manipulateur. Des simulations ont été effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink pour montrer les écarts entre les états réelles et désirées des positions et vitesses des deux articulations.

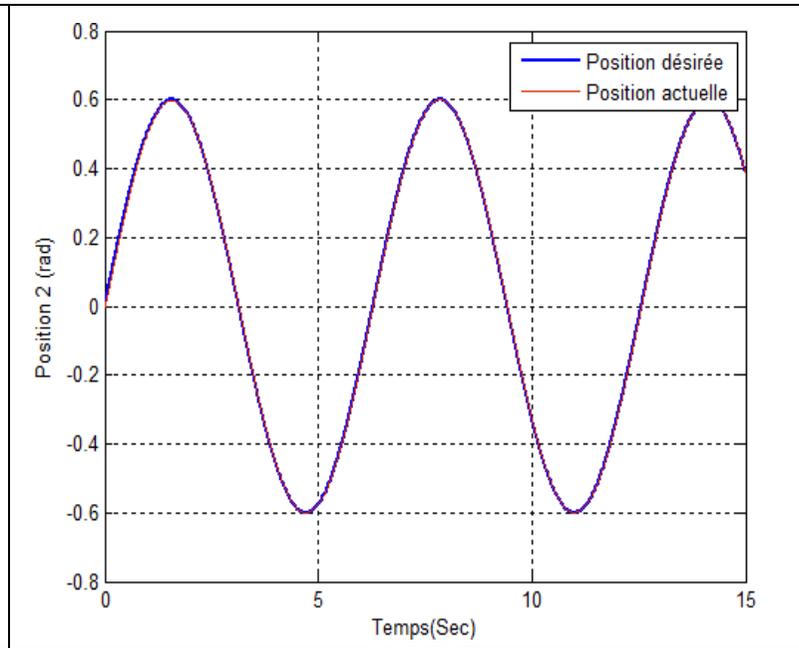
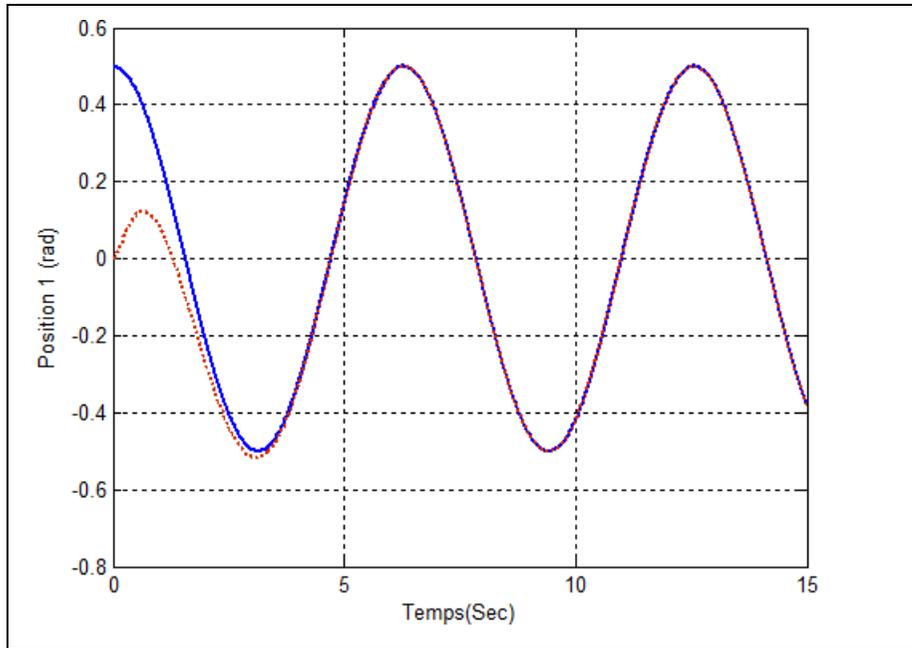
Un test de performances est effectué par simulation pour un problème de poursuite avec un trajectoire de référence pour la position $\theta_{1_d} = 0.5 * \cos(2\pi ft)$, $\theta_{2_d} = 0.6 * \sin(2\pi ft)$

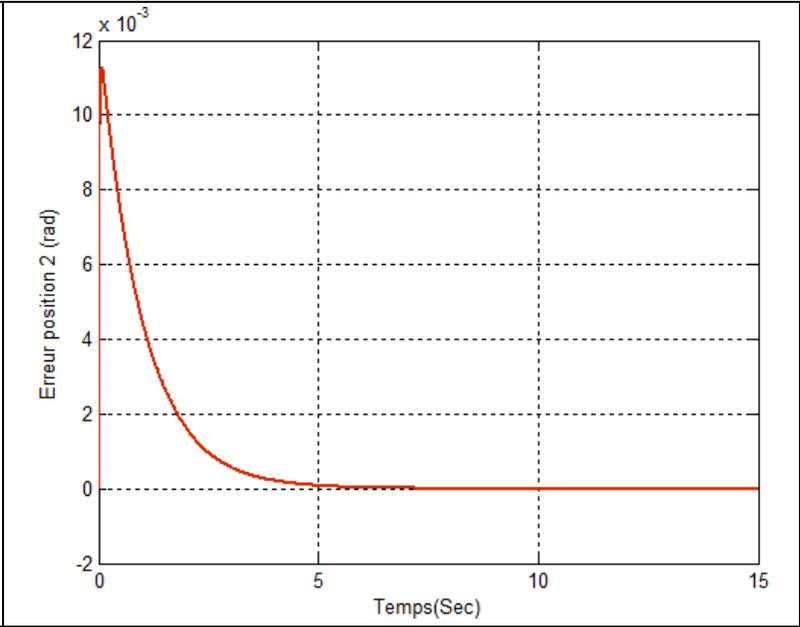
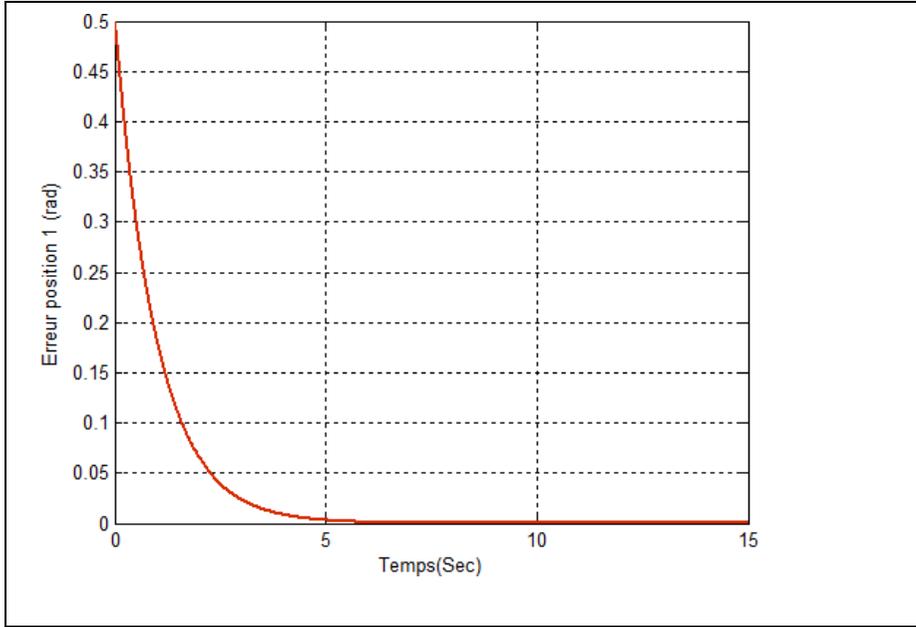
Les valeurs des paramètres utilisés lors de la simulation sont sélectionnées comme indiqué dans le tableau I.

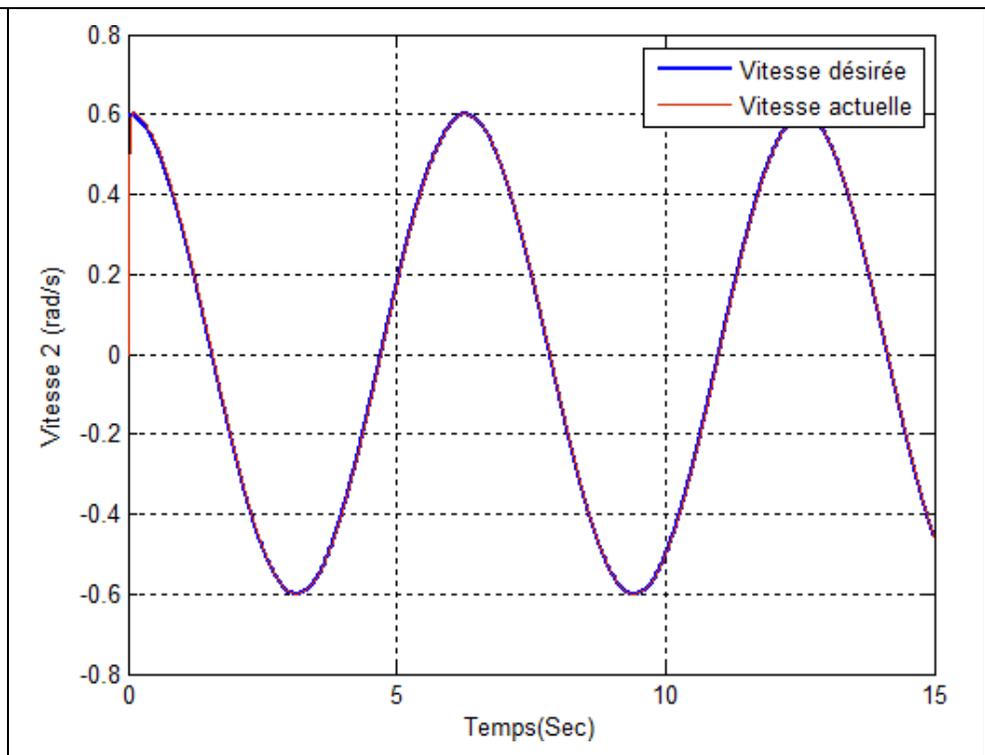
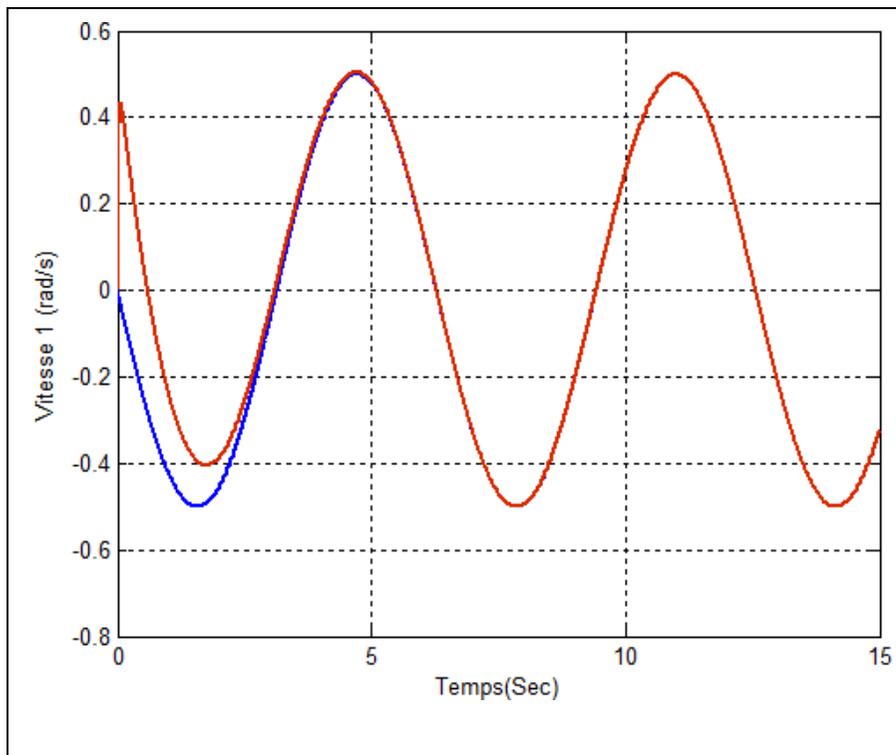
Paramètre	Valeur
m_1	$3Kg$
m_2	$1.5Kg$
l_1	$0.5m$
l_2	$0.6m$
m_1 et m_2 sont la masse des liens 1 et 2 l_1 et l_2 sont la longueur des liens 1 et 2	

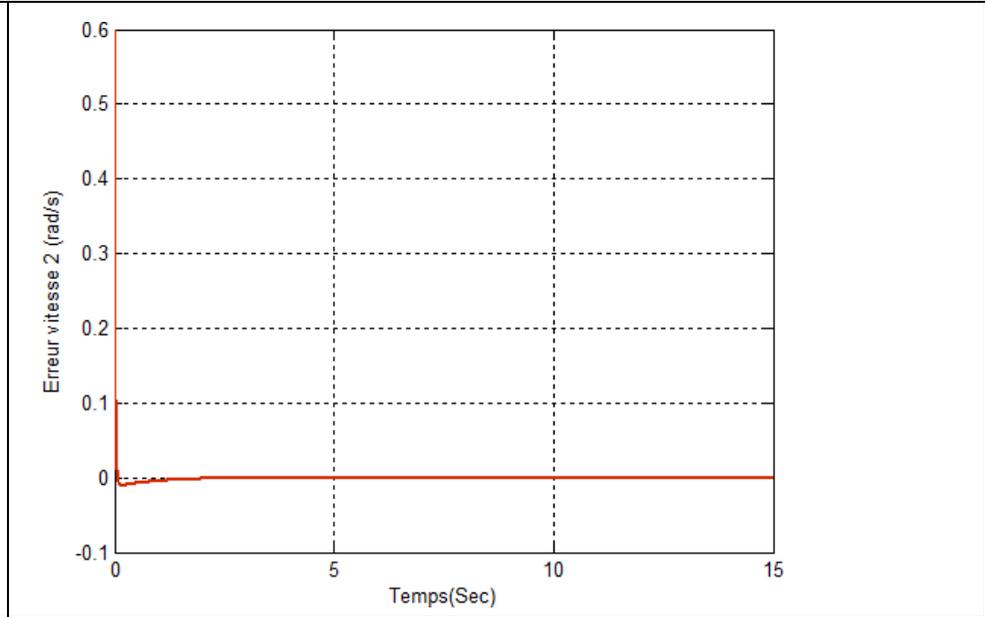
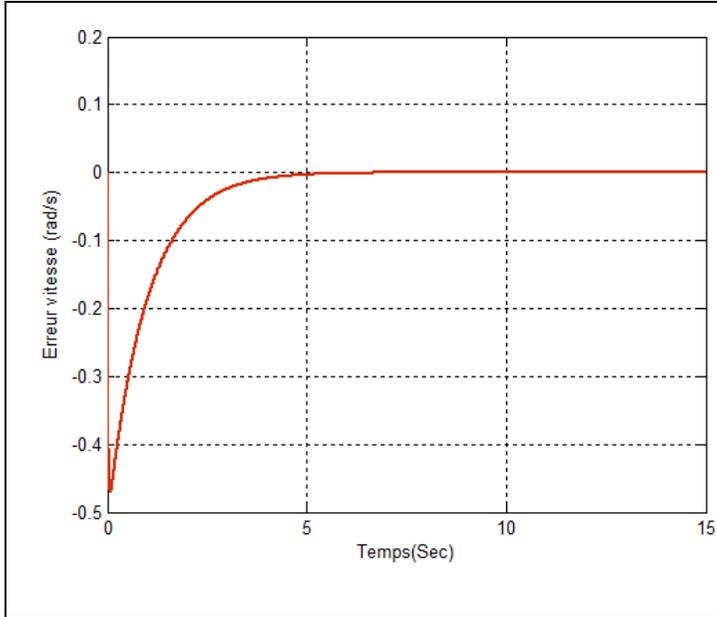
Pour que la convergence de l'erreur soit nulle, les gains du contrôleur dans la loi de commande (4) sont choisis comme suit

$K_P = 50I_{2 \times 2}$ et $K_D = 50I_{2 \times 2}$, où $I_{2 \times 2}$ représente une matrice identité de dimension 2×2 .









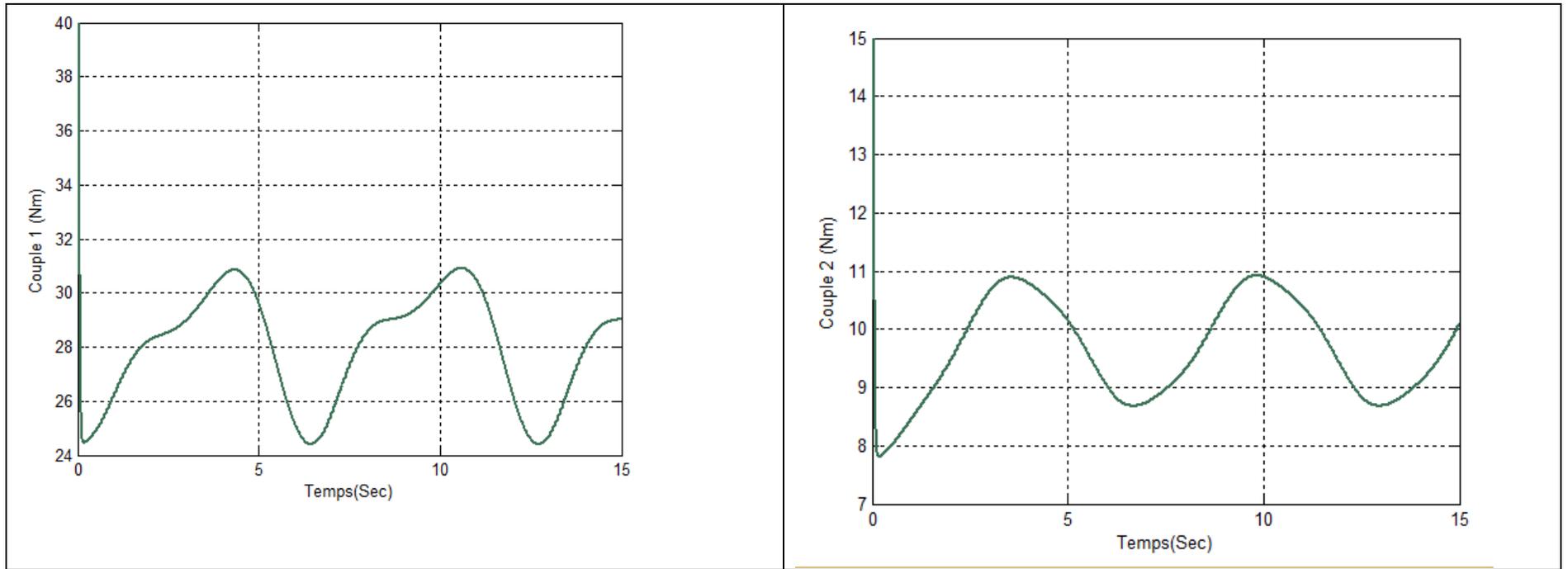


Figure: Réponses en position , vitesse et en couple du système robotisé à 2ddl à un contrôleur PID adaptatif.

1. Interprétations et commentaires

Nous constatons pour les figures 3, que les signaux de positions et vitesses réelles de l'articulation suivent parfaitement les trajectoires sinusoïdales désirées .

Les erreurs entre les signaux réels et ceux souhaités sont très faibles (négligées), par conséquent, nous pouvons conclure que le contrôleur fonctionne très bien et les objectifs de la commande sont donc réalisés .

Conclusion

L'analyse est présentée sans défaut appliqué aux liens du manipulateur. Les résultats prouvent que la commande PID adaptative minimise efficacement l'erreur entre les signaux réels et les signaux souhaités des positions et des vitesses.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce chapitre, une structure de commande PID adaptative est développée pour prendre en charge une classe de systèmes non linéaires incertains SISO. La loi de commande développée est basée sur une approximation de la commande idéale linéarisante d'un système non linéaire SISO incertain par une commande PID adaptative.

Dans ce travail, la modélisation mathématique de la dynamique du manipulateur 2-DOF est présentée. L'analyse est présentée dans deux cas; le premier sans collisions appliqué au liens du manipulateur, tandis que le second est le cas appliqué en collision.

La commande de PID adaptative est également présentée et une étude de simulation est exécutée en utilisant un mouvement sinusoïdal commandé simultanément aux deux articulations du manipulateur.

Les résultats prouvent que la commande adaptative minimise efficacement l'erreur entre les signaux réels et les signaux souhaités des positions, des vitesses et des accélérations et des articulations du manipulateur.

Les résultats de simulation issus de l'application de cette approche dans la commande d'un robot manipulateur à 2 ddl, montrent bien la faisabilité et l'efficacité de cette approche dans les applications réels.

Comme perspectives, nous suggérons d'étudier d'autres techniques de commande tel que la commande PID par les techniques de l'intelligence artificielle,.....

De faire les simulations sous l'environnement PYTHON .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Negrache Bensaouag « Commande dynamique et Adaptative des robots manipulateurs rigides en utilisant l’algorithme des moindres carrés et du gradient application à un robot à 3ddl, Puma » université d’Oran Es-Sénia, 23 octobre 2004.
- [2] Etienne Dombre et Wisama Khalil « Modélisation et commande des robots » Editions Hermes paris, 1988.
- [3] Merlet, J-P. 1997, Les robots parallèles. Editions Hermes, Paris.
- [4] Spong M.W. and M. Vidyasagar « Robot Dynamics and Control » John Willey and sons, New York, 1989
- [5] Canudas De Wit C, B. Brogliato, A. De Luca, B. Siciliano, P. Tomel, C. and R. Ortega, R. Lazano, G. Bastin, G. Campion, B. D’adrea Novel, and W. Khalil « Théories de la Commande des Robots » Laboratoire d’Automatique de Grenoble, 1992.
- [6] IFR. History of industrial robots : Milestones of technology and commercialization. 2012.
- [7] Stuart Shepherd and Alois Buchstab. Kuka robots on-site. In Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014, pages 373–380. Springer, 2014.
- [8] B. Siciliano and O. Khatib. Springer Handbook of Robotics. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [9] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. Robotics : Modelling, Planning and Control. Springer Verlag, London, 2010.
- [10] Mark W. Spong, Seth. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot Modeling and Control. John Wiley and Sons, Inc., Berlin Heidelberg, 2005.
- [11] John J Craig, Ping Hsu, and S Shankar Sastry. Adaptive control of mechanical manipulators. The International Journal of Robotics Research, 6(2) :16–28, 1987.

- [12] MC Good, LM Sweet, and KL Strobel. Dynamic models for control system design of integrated robot and drive systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1) :53–59, 1985.
- [13] L Sweet and M Good. Redefinition of the robot motion-control problem. *IEEE Control Systems Magazine*, 5(3) :18–25, 1985.
- [14] Mark W Spong. Modeling and control of elastic joint robots. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 109(4) :310–318, 1987.
- [15] Patrizio Tomei. A simple pd controller for robots with elastic joints. *IEEE Transactions on automatic control*, 36(10) :1208–1213, 1991.
- [16] K Khorasani. Nonlinear feedback control of flexible joint manipulators : A single link case study. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(10) :1145–1149, 1990.
- [17] MM Bridges and DM Dawson. Redesign of robust controllers for rigid-link flexible-joint robotic manipulators actuated with harmonic drive gearing. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 142(5) :508–514, 1995.
- [18] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [19] Anatol Pashkevich, Alexandr Klimchik, and Damien Chablat. Enhanced stiffness modeling of manipulators with passive joints. *Mechanism and machine theory*, 46(5) :662–679, 2011.
- [20] Mark W Spong. On the force control problem for flexible joint manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(1) :107–111, 1989.
- [21] Marco A Meggiolaro, Steven Dubowsky, and Constantinos Mavroidis. Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system. *Mechanism and Machine Theory*, 40(4) :415–427, 2005.
- [22] Omar Al Assad. Etude d’une méthodologie de modélisation et de commande d’un robot multiaxe pour une application en radiologie médicale. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, France, 2009.
- [23] Bélanger et Melanie : « commande de l’orientation d’un satellite basée sur la logique Floue » M.Sc.A., université de Sherbrooke (Canada).2005.
- [24] L.Y. Heong and K. Chong: «Software and Hardware for PID control: An overview And analysis of the current. Art », *IEEE control systems magazine*, PP42-54, February 2006.
- [25] I.D. Landau: « Adaptive Control: The model reference Approach ». Marcel Dekker, New York, 1979.

- [26] Telemceni : « Commande vectorielle avec régulateur adaptative de MSAP », thèse de Doctorat, M'sila, 1997.
- [27] J. E. Slotine and W. Li, Applied nonlinear control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [28] A. Isidori, Nonlinear control systems. 2nd Ed. Springer Verlag, Berlin, Germany, 1989.
- [29] P. A. Ioannou and J. Sun, Robust adaptive control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [30] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, Nonlinear and adaptive control design. New York: Wiley Interscience, 1995.
- [31] L. X. Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and stability analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.
- [32] J. T. Spooner and K. M. Passino, "Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 4, no. 3, pp. 339-359, 1996.
- [33] R. Boukezzoula, S. Galichet, and L. Foulloy, "Apprentissage de lois de commande floues pour les systèmes non linéaires (synthèse directe et indirecte), in Conf. LFA'98, Rennes, 1998, pp. 19-27.
- [34] Y. C. Chang, "Adaptive fuzzy-based tracking control for nonlinear SISO systems via VSS and H^∞ approaches," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 9, no. 2, pp. 278-292, Apr 2001.
- [35] S. Labiod, M. S. Boucherit, and T. M. Guerra, "Commande adaptative floue d'une classe de systèmes non linéaires monovariables," in Conf. LFA'03, Tours, 2003, pp. 169-176.
- [36] S. H. Tong, Q. Li, and T. Chai, "Fuzzy adaptive control of a class of nonlinear systems," Fuzzy sets and Systems, vol. 101, no. 1, pp. 31-39, 1999.
- [37] V. Gazi and K. M. Passino, "Direct adaptive control using dynamic structure fuzzy systems," in Proc. ACC, Illinois, June 2000, pp. 1954-1958.
- [38] S. Labiod and M. S. Boucherit, "Direct stable fuzzy adaptive control of a class of SISO nonlinear systems," Archives of Contr. Sci., vol. 13, no. 1, pp. 95-110, 2003.
- [39] Y. Tang, N. Zhang, and Y. Li, "Stable fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems," Fuzzy sets and Systems, vol. 104, no. 22, pp. 279-288, 1999.
- [40] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive control. Addison- Wesley, New York, 1995.
- [41] W.D. Chang, R.C. Hwang, and J.G. Hsieh, "A self-tuning PID control for a class of nonlinear systems based on the Lyapunov approach," J. of Process Contr., vol. 12, no. 2, pp. 233-242, 2002.

[42] M. Feki, "An adaptive feedback control of linearizable chaotic systems," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 15, no.5, pp. 883-890, 2003.

[43] E.M. Jafarov, M.N.A. Parlakç1, and Y. Istefanopulos, "A new variable structure PID-controller design for robot manipulators," *IEEE. Trans. On Contr. Syst. Tech.*, vol. 13, no. 1, pp. 122-130, 2005.

[44] Frank L.Lewis Darren M.DawsonChaoukiT.Abdallah , "Robot Manipulator Control Theory and Practice", Second Edition, 2004 by Marcel Dekker, Inc.

[45] A. Boubakir†, S. Labiod†, and T.M. Guerra LAMEL, "Commande PID Adaptative des Systèmes non Linéaires Affines en la Commande ", EMP, ALGER, 13-14 Avril, 2009

