



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Electronique system embarqué

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
KHIREDDINE Salah

Le : mercredi 22 juin 2022

Modélisation et commande par couple calculé d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté

Jury :

M.	MAGHERBI Mohamed Larbi	MCA	University of Biskra	President
Mme.	OUARHLENT Saloua	MAA	University of Biskra	Superviseur
M.	TERGUINI Ouarda	MCA	University of 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 system embarqué

Réf. : Entrez la référence du document

Conception, modélisation et commande par couple calculé d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté

Le : mercredi 22 juin 2022

Présenté par :

Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Résumé

Dans ce travail, la dynamique des manipulateurs 2-DOF est présentée. L'analyse mathématique du modèle dynamique pour deux cas est effectuée : dans le premier cas, le manipulateur se déplace sans aucune collision (forces extérieures), alors que dans le second cas la force est appliquée sur le manipulateur. La commande de couple calculée (CTC) a été appliquée au manipulateur. L'algorithme, implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink. Les signaux réels et souhaités des positions, vitesses et accélérations des articulations du robot 2-DOF sont comparés, qu'il y ait collision ou non. Les résultats de simulation démontrent clairement l'efficacité de l'approche présentée en termes de suivi de trajectoire.

Abstract

In this work, the dynamics of 2-DOF manipulators are presented. The mathematical analysis of dynamic model for two cases is carried out, in the first case, the manipulator moves without any collision, whereas in the second case the external force is applied on the manipulator. Computed Torque Control (CTC) has been applied to the manipulator. The algorithm, implemented in MATLAB/Simulink environment. The actual and desired signals of the positions, velocities and accelerations of the joints of the 2-DOF robot are compared, whether there is a collision or not. Simulation results clearly demonstrate the efficacy of the presented approach in terms of trajectory tracking.

Keywords: *Robot-Manipulator, Multi-DOF robotic manipulator, Mathematical modelling, Controller Design, Collision, Computed-Torque Control.*

Introduction générale.....7

Chapitre I : Généralités Sur Les Robots Manipulateurs Rigides

1. Introduction.....	9
2. Définition d'un robot.....	9
3. Classification des robots.....	10
3.1. Classification fonctionnelle.....	10
3.2. Classification géométrique.....	10
3.3. Classification par génération.....	12
4. Rôle et domaines d'application des robots.....	13
5. Robot manipulateur rigide.....	13
6.1 .La Structure Mécanique Articulée	14
6.2. L'effecteur.....	17
7. Caractérisation d'un robot.....	17
8. Conclusion.....	18

Chapitre II : Modélisation Dynamique Des Robots

Manipulateurs

1. Introduction.....	20
2. Modélisation.....	20
2.1. Modèle Géométrique direct et inverse.....	20
2.1.1. Modèle Géométrique direct.....	20
2.1.2. Modèle Géométrique inverse.....	21
2.2. Modèle cinématique direct et inverse.....	21
2.2.1. Modèle cinématique direct.....	21
2.2.2. Modèle cinématique inverse.....	22
2.3. <i>Modèle dynamique</i>	22
2.3.1. <i>Modèle dynamique inverse</i>	23
2.3.1.1. Formalisme de Lagrange.....	23
3. Conclusion.....	29

Chapitre III : Commandes des robots manipulateurs

Sommaire

1. <i>Introduction</i>	31
2. Techniques de commande des robots.....	31
2.1. Commande classique.....	31
2.2. Commande dynamique.....	33
2.3. Commande adaptative.....	35
3. Commande à Couple Calculé.....	36
4. Conclusion.....	40

Chapitre IV : Tests et validation

1. Étude de simulation.....	42
2. Détermination des paramètres.....	42
3. Modèles Simulink.....	43
4. Les résultats de simulation.....	45
5. Interprétations et commentaires.....	51
6. Conclusion.....	51

Conclusion générale.....	52
---------------------------------	-----------

Introduction générale



Introduction générale

Depuis l'histoire ancienne, l'homme a essayé d'inventer un robot, mais il le contrôle mécaniquement et ne fait que certaines choses, comme le mouvement et le son de la musique, et après le développement de ce qui s'est passé dans le monde de l'électronique et de la programmation, les robots se sont développés avec lui, Au 18 siècle, les fabricants de jeux ont produit un grand nombre de machines humanoïdes automotrices capables de parler et de jouer aux échecs, L'inventeur le plus célèbre de ce jeu est Jacques de Vaucanson, Et après de grands développements jusqu'à 1994 ce qu'il soit utilisé dans le domaine de la médecine et aide dans les opérations chirurgicales, Et depuis l'année 1994 jusqu'à nos jours, les robots sont utilisés dans tous les domaines, par exemple (sport, industrie,...etc.).

La commande des robots manipulateurs est l'une des préoccupations majeures des recherches en asservissement. En effet, un robot manipulateur est caractérisé par un comportement purement non linéaire, de plus, la majorité des tâches qui lui sont confiées sont délicates et exigent une très grande précision sous des trajectoires rapides, afin de répondre à des critères de performances toujours croissants.

Les robots manipulateurs ont de grandes difficultés pour les chercheurs à les contrôler. Ce type de robot est utilisé dans les usines d'assemblage de voitures et le domaine de l'emballage, et il a remplacé les humains dans les usines et les bras mécaniques avec une poignée à trois doigts ou plus et une forte capacité de préhension.

Dans cette mémoire, nous nous intéressons à la planification de trajectoires des systèmes robotisé par la commande de couple calculé (CTC).

Ce mémoire est décomposé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous parlons des généralités du robot manipulateur et des concepts initiaux.

Le deuxième chapitre parle de la modélisation dynamique des robots manipulateurs.

Le troisième chapitre parle de la commande du bras manipulateur et de sa programmation.

Pour cela ce travail est structuré autour de quatre chapitres principaux :

Introduction générale

- Dans le premier chapitre nous exposons une introduction sur les robots industriels, les éléments constitutants d'un robot manipulateur .

- Le deuxième chapitre sera consacré aux modélisations des robots après avoir rappelé les principes et les méthodes de la modélisation.
 - 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 (CTC).

- 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 I

Généralités Sur Les Robots Manipulateurs Rigides



1. Introduction

Les robots ont été initialement conçus comme une source d'amusement et divertissement. Au moment où le domaine de la robotique progresse, il a changé la face de son objectif initial. Maintenant, les robots sont partie essentielle des industries automatisées. Ils deviennent plus d'un besoin qu'un luxe pour la croissance industrielle. En outre, les robots sont utilisés pour la rééducation, l'assistance, réalité virtuelle, centrales nucléaires et ainsi de suite. Actuellement la robotique est l'un des sujets les plus intéressants pour les scientifiques.

Dans ce premier chapitre nous commençons par la définition du système dynamique non linéaire, ensuite nous présentons quelques définitions de base concernant le domaine de la robotique, et en terminera ce chapitre par une conclusion [1].

2. Définition d'un robot

Le robot est un système automatique dont la partie opérative est une structure mécanique articulée (figure 1)

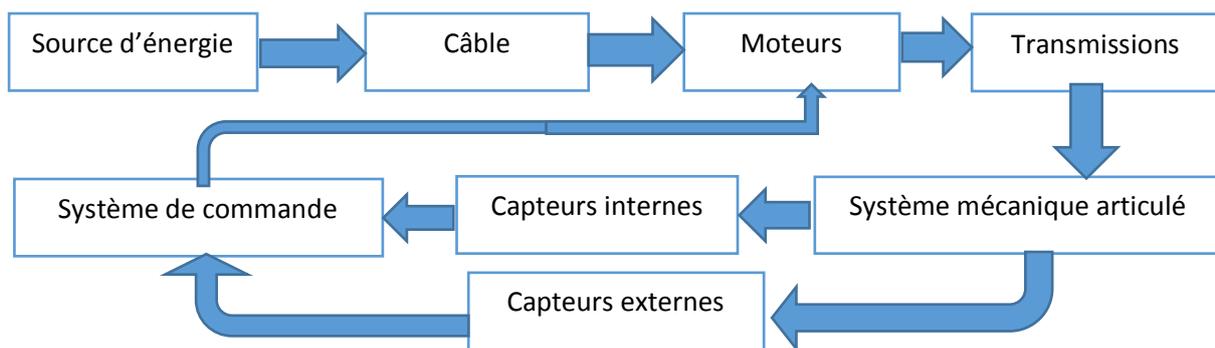


Figure 1. Parties commande-contrôle et opérative du robot

L'Organisation Internationale de Normalisation définit le robot comme étant un manipulateur à plusieurs degrés de liberté, à commande automatique, reprogrammable, multiplications, mobile ou non, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle [2].

3. Classification des robots

3.1. Classification fonctionnelle

L'A.F.R.I. distingue 4 classes illustrées ci-dessous :

A : robots manipulateurs télécommande ou à commande manuelle.

B : quand le réglage se fait mécaniquement, on les appelle manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés, la commande peut se faire par automate programmable.

C : la première génération de robots industriels nous donne les robots programmables.

D : les robots de seconde génération qui sont capable à utiliser des informations sur l'environnement est dite 'robot intelligents'. L'utilisation de l'intelligence artificielle donne les robots de troisième génération

Les robots chez les Européens et les Américains sont seul des classes C et D.

Les manipulateurs de classe B appellent 'pick and place' chez les Américains [3].

3.2. Classification géométrique

La configuration géométrique joue un rôle très important dans le classement des robots suivant leur l'architecture de leur porteur. Les combinaisons de translations et de rotations des 3 premiers ddl d'un robot réalisent plusieurs types de porteur, autrement dit par des articulations prismatiques (P) ou rotoïdes (R) ; en pratique, on n'utilise que 4 ou 5 d'entre elles :

-la première combinaison d'où les 3 articulations ont des mouvements identiques (translation TTT) nous donne un porteur cartésien.

- la deuxième combinaison d'où les 3 articulations ont un mouvement de rotation, translation axiale et une translation radiale (RTT) nous donne un porteur cylindrique.

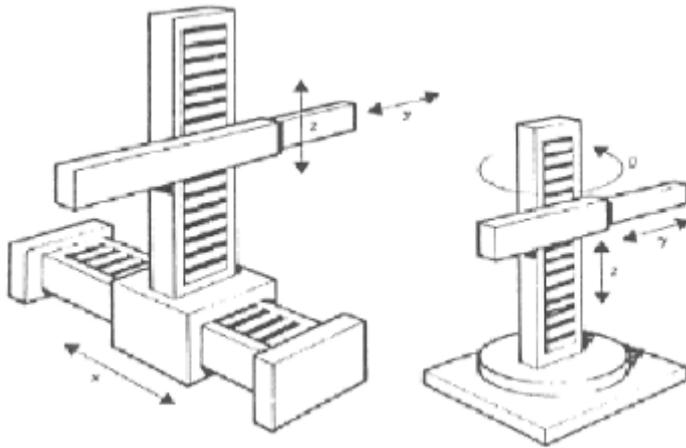


Figure 2 : Coordonnées cartésiennes et cylindriques

- la troisième combinaison d'où les 3 articulations ont deux mouvements rotoïdes et une translation radiale (RRT) nous donne un porteur en coordonnées polaires.

- la quatrième combinaison d'où les 3 articulations ont des mouvements identiques (rotation RRR) dite anthropomorphe nous donne un porteur en coordonnées universelles.

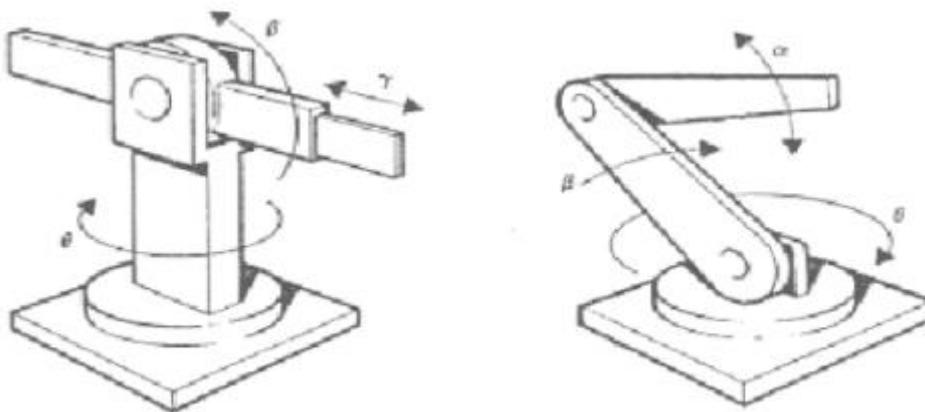


Figure 3 : Coordonnées polaires et universelles.

-la cinquième combinaison on s'appelle cette architecture " SCARA " qui a 4 articulations ont des mouvements rotationnels et prismatiques [3].



Figure 4 : Robot SCARA.

3.3. Classification par génération

On retiendra 3 types de robot :

- Les robots manipulateurs
- Les télémanipulateurs
- Les robots

Pour cette dernière classe, on peut distinguer :

1- Les robots manipulateurs industriels, chargés de manipuler, soient

- Des pièces : Stockage – déstockage. Palettisation – dé-palettisation. Chargement – déchargement de machine-outil. Manipulation d'éprouvettes. Assemblage de pièces,
- Des outils : Soudure en continu ou par points, Peinture, Collage, Ebavurage.

2- Les robots didactiques

Ils sont utilisés pour effectuer des tests de faisabilité d'un poste robot. La technologie est différente, de même que les constructeurs. Ils ont un rôle de formation et d'enseignement.

3- Les robots mobiles autonomes

Les possibilités sont plus vastes, du fait de leur mobilité. Notamment, ils peuvent être utilisés en zone dangereuse (nucléaire, incendie, sécurité civile, déminage), inaccessible (océanographie, spatial). De tels robots font appel à des capteurs et à des logiciels

sophistiqués. On peut distinguer 2 types de locomotion : Les robots marcheurs qui imitent la démarche humaine, et les robots mobiles qui ressemblent plus à des véhicules [3].

4. Rôle et domaines d'application des robots

Le rôle premier d'un robot est d'effectuer des tâches répétitives et/ou précises. Les robots permettent également d'effectuer des tâches dans des environnements de travail trop dangereux pour l'Homme [3].

Les robots peuvent effectuer des tâches automatiques, mais certains sont aussi dotés d'une certaine intelligence. Leurs facultés d'adaptation nécessitent des qualités de perception dans le but d'interagir avec leur environnement.

Les systèmes robotiques intéressent de très nombreux domaines civils et militaires. Les grands champs d'application de la robotique sont :

- ❖ La production manufacturière (usinage, assemblage, soudure, polissage, formage, etc.) : la diminution des coûts de productions et l'amélioration de sa qualité ainsi que de sa reproductibilité.
- ❖ Les interventions en milieux hostiles (sous-marin, nucléaire, exploration planétaire, etc.).
- ❖ Les systèmes de transport des biens et des personnes (véhicules intelligents, robots mobiles, etc.).
- ❖ L'aide et l'assistance aux personnes (robots personnels, aides techniques, etc.) ∞ Les nombreux domaines de la santé (chirurgie, rééducation, pharmaceutique etc.).
- ❖ Le ludique (robots jouets). Ils prennent des formes très diverses du point de vue de leur structure mécanique et de leur commande [3].

5 .Robot manipulateur rigide

Un robot est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches, il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminent par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autre fonction sans modification permanence du matériel.

Cette définition est le reflet des différentes composantes d'une cellule robotisée, 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 [4].

La robotique est donc une science pluridisciplinaire qui requiert des connaissances en mécanique, électrotechnique, traitement du signal, informatique, communication, automatique.... [4].

6.1 La Structure Mécanique Articulée

Le système mécanique articulé (S.M.A.) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés La structure mécanique d'un robot se distingue par trois ensembles :

-Le véhicule

Le véhicule assure le transport de la structure mécanique vers la zone d'action

-Le porteur

Le rôle du porteur consiste à mener un point du robot vers un lieu précis de l'espace. Il se compose des trois premiers degrés de liberté. Les différentes configurations sont résumées sur la (figure 5) [2].

Ce paragraphe est relatif aux chaînes ouvertes simples. Afin de dénombrer les différentes architectures possibles, on ne considère que 2 paramètres : le type d'articulation (rotoïde (R) ou prismatique (P)) et l'angle que font deux axes articulaires successifs (0° ou 90° ; sauf cas très particulier, les axes consécutifs d'un robot sont soit parallèles, soit perpendiculaires) [6].

On convient d'appeler les 3 premiers d.d.l. le porteur du robot. Les d.d.l. résiduels forment le poignet, caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et une plus faible masse.

Sont schématisées dans la figure qui suit les 12 morphologies possibles de porteur (ces morphologies sont non redondantes (on élimine a priori les structures limitant les mouvements du porteur à des déplacements linéaires ou planaires : 3 liaisons prismatiques d'axes parallèles, par exemple, ou 3 liaisons rotoïdes d'axes parallèles)) [6].

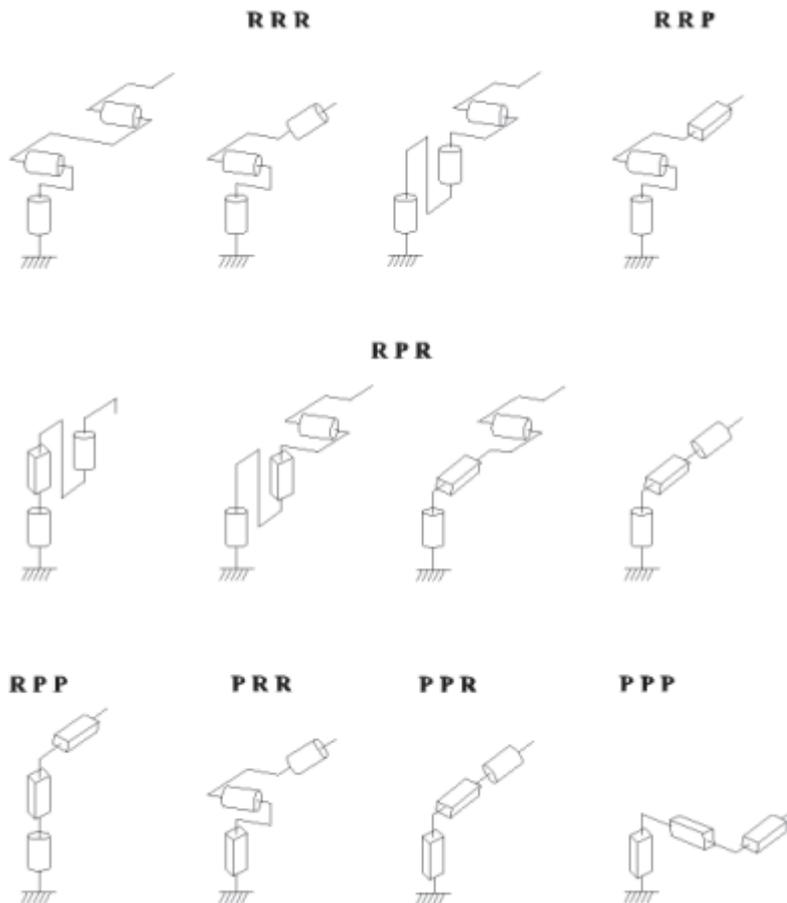


Figure 5 Principales architectures du porteur

Chaque architecture donne un espace de travail différent, convenable à la tâche à accomplir par le robot. L'espace de travail est l'espace qui peut être balayé par le point de référence du poignet, augmenté de la plage de mouvement des articulations du poignet.

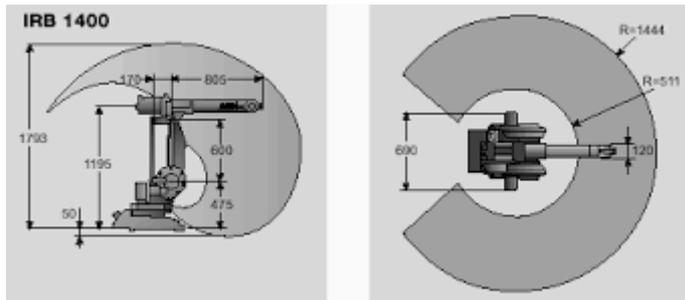


Figure 6 Représentation du volume de travail

-Le poignet

Il assure l'orientation d'un vecteur passant par l'extrémité du porteur. Trois degrés de liberté en rotation autour de trois axes concourant sont nécessaires pour atteindre toutes les orientations possibles. Toutes les structures mécaniques ne possèdent pas un poignet à trois degrés de liberté, ce qui réduit leurs potentialités mais également leur coût [2].

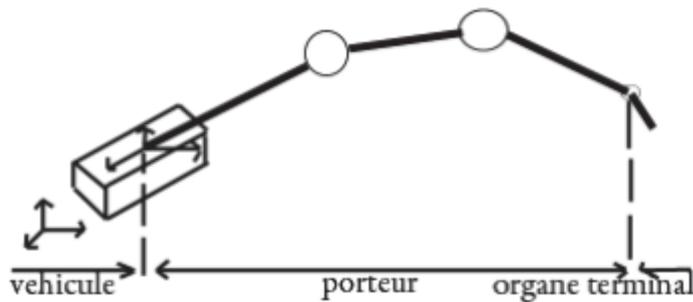


Figure 7 La structure mécanique articulée

Types de chaînes de la SMA

On distingue trois types de chaînes:

- Chaînes ouvertes simples(A) (aucun retour mécanique d'un segment à un autre dans la chaîne).
- Chaînes arborescentes(B) (il existe plusieurs organes terminales qui agissent en parallèle)
- Chaînes fermées(C) (il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne) [2].

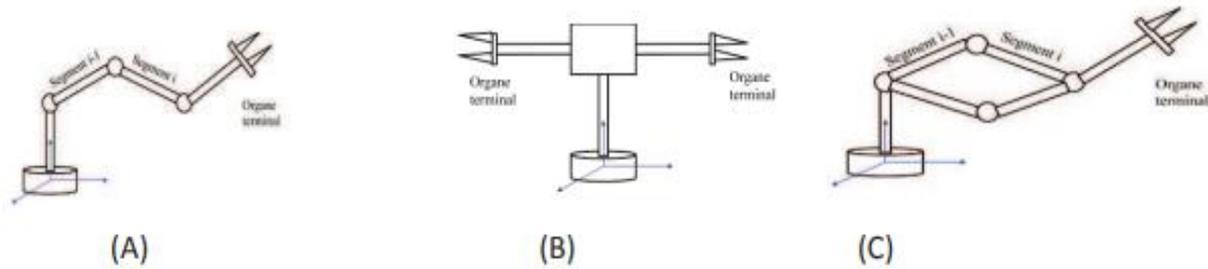


Figure 8 Types de chaînes

6.2. L'effecteur

L'effecteur Est l'organe terminal du robot, fixé au poignet. Ce dernier se termine généralement par une plaque percée de trous filetés; cela permet la fixation de différents effecteurs à un robot universel et donc l'adaptation de celui-ci à des tâches spécifiques. Cet élément fera l'objet de la deuxième partie de l'étude bibliographique [2].

7. Caractérisation d'un robot

L'intérêt d'une caractérisation est de mettre à la disposition des différents intervenants dans le domaine de la robotique, comparaison efficace des performances de plusieurs manipulateurs et de leur permettre ainsi d'effectuer le meilleur choix possible du robot.

Cependant, la versatilité (flexibilité d'utilisation), l'auto adaptabilité a l'environnement (Capacité d'initiative) ou encore la complexité technologique des robots rend leur caractérisation très difficile, le but essentiel est de caractéristiques permettent de réaliser cet objectif :

- Morphologie : Morphologie et est basé sur une combinaison de deux paramètres, le type de joints tournants ou prismatique et les angles que font les deux axes des applications consécutives (0 ou 90°).
- Espace de travail : appelé aussi volume accessible, c'est l'ensemble des points auxquels peut accéder l'organe terminal du robot.
- Précision : les imprécisions (> 1 mm) sur le positionnement absolu sont dues essentiellement aux erreurs dans le modèle géométrique, aux erreurs de quantification de la mesure de position ou encore aux flexibilités.

- Respectabilité : c'est l'erreur maximale de positionnement répétée de l'outil en tout point de son espace de travail, elle est en général inférieure à 1 mm
- Vitesses et accélérations max : Elles dépendent de la qualité des actionneurs utilisés il existe deux vitesses : la vitesse maximale de translation ou de rotation de chaque axe, les constructeurs donnent souvent une vitesse maximale de l'organe terminal. L'accélération maximale, est donnée pour chaque axe dans sa configuration la plus défavorable (charge maximale, inertie maximale), elle dépend fortement de l'inertie et donc de la position du robot
- Charge utile : la charge utile est la charge maximale que peut porter le robot sans dégrader Sa respectabilité, Elle est différent de la charge maximale que peut porter le robot qui dépend directement des actionneurs, les méthodes et les essais à effectuer afin de déterminer ces caractéristiques sont décrits de manière détaillée dans des normes spécifiques. Pour notre, nous ne pouvons dans le cadre de ce travail faire une caractérisation du robot, d'une part, ceci n'est pas l'objet du projet, d'autre part, une caractérisation nécessite l'achat de normes et l'utilisation d'appareils de mesure Perfectionnés et dont nous ne disposons malheureusement pas [5].

8. Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre quelques définitions concernant le robot manipulateur rigide, la structure mécanique articulée et caractérisation d'un robot

Chapitre II

Modélisation Dynamique Des Robots Manipulateurs



1. Introduction

Pour commander un robot où pour simuler son comportement on doit disposer de modèles. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques.

Dans le présent chapitre, on présentera quelques définitions concernant ces modèles ainsi que la façon de leurs obtentions.

2 .Modélisation

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 exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

2 .1 .Modèle Géométrique direct et inverse

2 .1 .1.Modèle Géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) permet de déterminer la position et l'orientation de l'organe terminal du manipulateur par rapport à un repère de référence en fonction des variables articulaires. Ce modèle ne prend pas en compte la vitesse de déplacement ni les forces et les moments qui créent le mouvement. Le modèle s'écrit [7]:

$$X = f(q) \quad (1)$$

Où

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$, : Vecteur des variables articulaires.

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$: Vecteur des variables opérationnelles

2.1.2. Modèle Géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles, le modèle s'écrit [7]:

$$q = f^{-1}(X) \quad (2)$$

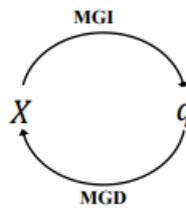


Figure 1

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer le modèle géométrique inverse on cite :

Les méthodes géométriques et les méthodes algébriques

2.3 .Modèle cinématique direct et inverse

2.3.1. Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct MCD d'un robot manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles (\dot{X}) en fonction des vitesses articulaires(\dot{q}) [7]. Il s'écrit :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3)$$

Où

$J(q)$ désigne la matrice Jacobéenne de dimension $m \times n$ du mécanisme et qui est égale à $\frac{\partial x}{\partial \dot{q}}$

\dot{X} : vitesse opérationnelle.

\dot{q} : vitesse articulaire.

2.3.2. Modèle cinématique inverse

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

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (4)$$

Si nous avons assigné les axes des articulations basées sur la représentation de Denavit Hartenberg, les paramètres (D-H) pour le robot 2-R seront définis comme dans le tableau ci-dessous :

link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2

Table 1 D-H paramètre robot a 2DDL

La position initial (à $t = 0$) et de la matrice de transformation homogène où

$$\theta_1 = 0^0, \theta_2 = 0^0, \text{ on a la figure suivante (I.8) :}$$

1.2.4. Modèle dynamique

Le modèle dynamique est la relation entre les couples et/ou forces appliqués aux actionnaires et les positions, vitesses et accélérations. Le modèle dynamique est présenté par une relation de la forme [8]:

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (5)$$

Avec :

Γ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires, 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 extérieur (fores et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse (MDI) 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 [8]:

$$\Gamma = f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (6)$$

Γ : 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 qui 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.

I.2.4.1 Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du robot. La forme générale représentant le mouvement d'un robot manipulateur constitué de n degrés de liberté et de n articulations, s'écrit suivant Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \theta} = \tau \quad (7)$$

L : Fonction lagrangienne de robot égale à : $L = E_c - E_p$

E_c : Energie cinétique totale du robot manipulateur.

E_p : Energie potentielle totale du robot manipulateur.

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

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

Dans notre travail, nous avons considéré d'abord un robot manipulateur à 2ddl, donné par figure (I-7), dont le mouvement des articulations est rotoïde, nous avons donc $q_i = \theta_i$

Tel que :

$$q = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad \text{et} \quad \tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$$

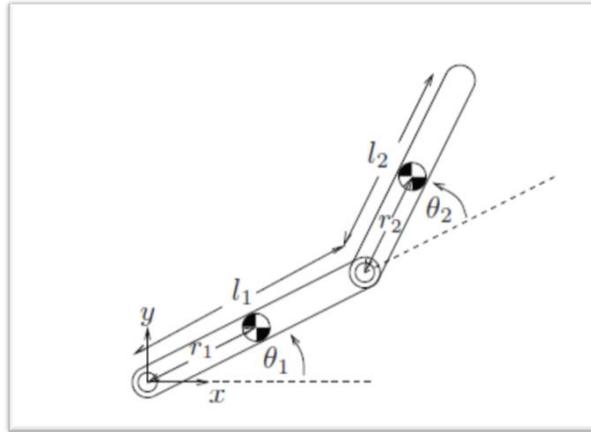


Figure 2. Bras à deux degré de liberté (2ddl)

A partir de la figure 2, 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 :

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

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

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

➤ **Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p link1**

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

K : L'énergie cinétique

P : L'énergie potentielle

➤ **Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p link2**

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

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 $L = E_c - E_p$**

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

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ & - (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 - m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ \quad + m_2 l_1 l_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{array} \right. \quad (15)$$

Ce qui donne :

$$\tau_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (16)$$

$$\tau_2 = [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (17)$$

Alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix}}_{M(\theta)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}}_{C(\theta, \dot{\theta})} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}}_{G(\theta)} \end{aligned} \quad (18)$$

En robotique, si le mouvement des articulations constituant le robot manipulateur est rotoïde, l'expression du couple peut être s'exprimer sous la forme matricielle suivante, ce qui correspond au modèle dynamique du robot :

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) \quad (19)$$

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.

Soit $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$, le développement de l'équation (23) donne :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = M(\theta)^{-1}[\tau - C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - G(\theta)] \quad (21)$$

La force externe est perpendiculaire au lien 1

S'il y a une force externe exercée perpendiculairement sur le lien 1 comme indiqué sur la Figure 3, l'équation dynamique est dérivée par les étapes suivantes [9]

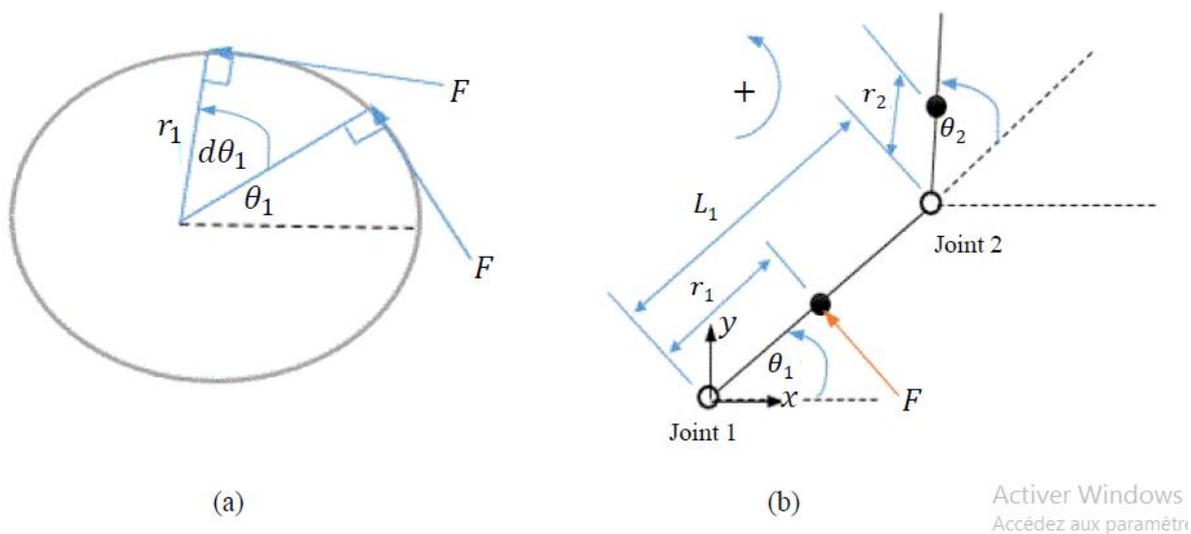


Figure 3. Effet de la force externe (collision) sur le couple des articulations :

(a) Liaison après rotation sous l'effet de la force externe. (b) Force perpendiculaire externe (collision) sur le lien 1.

Le travail effectué par la force F est donné par

$$dw = Fr_1 d\theta_1 \quad (22)$$

L'énergie potentielle $E_p(\theta)$ est égale au travail effectué par la force F donc

l'énergie potentielle E_p

$$E_p(\theta) = dw = Fr_1 d\theta_1 \quad (23)$$

En prenant la dérivée de (6) selon θ_1 et θ_2

$$\frac{\partial E_p}{\partial \theta_1} = Fr_1, \quad \frac{\partial E_p}{\partial \theta_2} = 0 \quad (24)$$

Ainsi, l'équation du mouvement du manipulateur est convertie de (20) en l'équation suivante

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \\ & \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}}_{M(\theta)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \\ & \underbrace{\begin{bmatrix} -m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2 \end{bmatrix}}_{C(\theta, \dot{\theta})} + \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}}_{G(\theta)} + \\ & \begin{bmatrix} Fr_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25) \end{aligned}$$

3. Conclusion

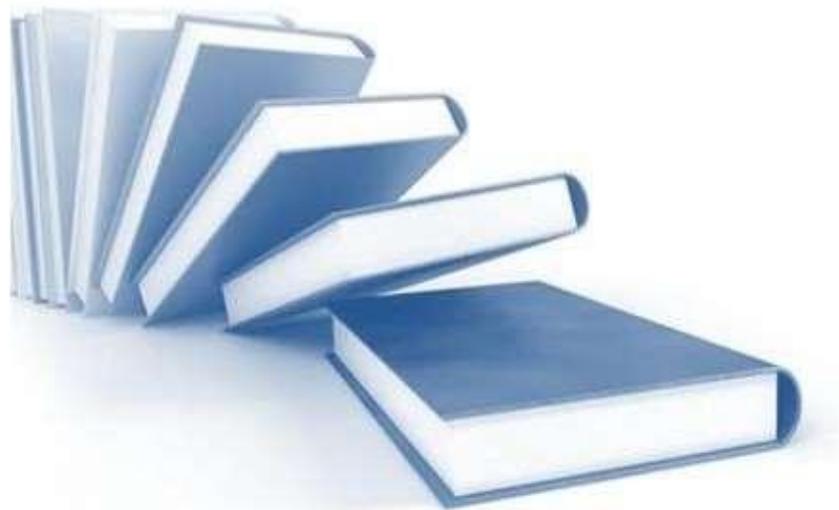
Ce chapitre est consacré à la modélisation des robots manipulateurs, le modèle cinématique directe et inverse, le modèle dynamique et le modèle dynamique inverse, ainsi nous avons assigné les axes des articulations basés sur la représentation de Denavit Hardenberg.

Les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie ont été développé par le formalisme de Lagrange pour le robot à 2 ddl .

Le robot manipulateur à deux degré de liberté sera utilisé pour tester les performances de la commande proposées dans ce travail.

Chapitre III

Commandes des robots manipulateurs



1. Introduction

La commande des robots manipulateurs a pour but de contrôler le déplacement des actionneurs suivant une trajectoire programmée. Donc le problème de la commande des robots manipulateurs peut être formulé comme la détermination de l'évolution des forces généralisées (forces ou couples) que les actionneurs doivent exercer pour garantir l'exécution de la tâche tout en satisfaisant certains critères de performance. Des manipulateurs, des recherches avancées ont permis de faire émerger de nouvelles techniques de commande non linéaire pour les applications aux robots manipulateurs.

2. 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 vu les différentes perturbations agissant sur les robots manipulateurs, et les 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 [10]:

- Commande classique
- Commande dynamique
- Commande adaptative

2.1. 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 [10].

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.

2.2. 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.

La commande dynamique n'est pas dans tous les cas le type de commande nécessaire pour obtenir une bonne précision et une bonne stabilité. En effet une commande classique suffit lorsque le robot manipulateur évolue sans contraintes de performance, de rapidité et de précision car dans ce cas, les inerties ont une influence moins importante,

La figure 2 présente le schéma d'une commande dynamique par découplage non-linéaire. [10]

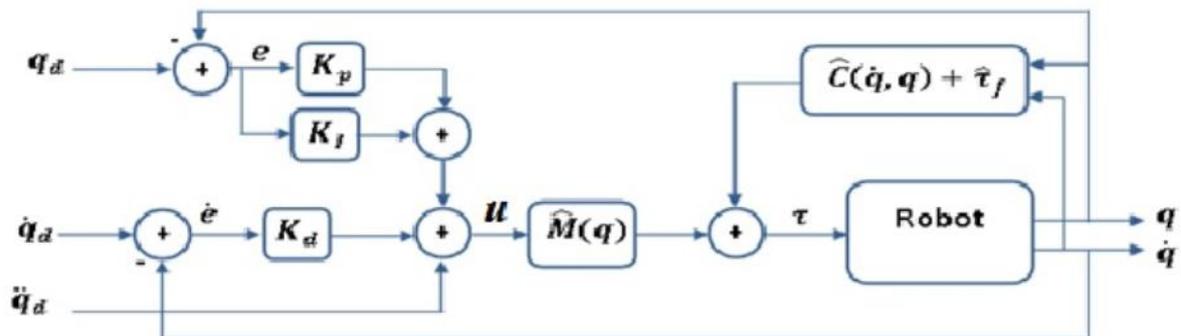


Figure 2 : Schéma d'une commande dynamique par découplage non-linéaire

Si l'équation du modèle est comme suit :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + \tau_f(q) \quad (1)$$

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

$$\tau = \hat{M}(q)u + \hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{\tau}_f(q) \quad (2)$$

$$\text{Où : } u = \ddot{q}_d + K_p(q_d - q) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_I \int_0^t (q_d - q) dt \quad (3)$$

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

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

Dans le cas où le modèle dynamique est exact, l'équation (II.11) nous donne l'équation de l'erreur $e=(q_d - q)$.

$$\ddot{e} + K_D \dot{e} + K_p e + K_I \int_0^t e(t) dt = 0 \quad (4)$$

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

À partir de l'équation (II.12) nous déduisons la fonction de transfert entre la position désirée et la position réelle mesurée :

$$\frac{q_i}{q_{di}} = \frac{S^3 + K_{Di}S^2 + K_{Pi}S + K_{Ii}}{S^3 + K_{Di}S^2 + K_{Pi}S + K_{Ii}} \quad (5)$$

La fonction de transfert (II.13) est unitaire, donc la trajectoire du robot doit suivre exactement la trajectoire d'erreur de modélisation.

Si le vecteur de commande u est obtenu par un correcteur proportionnel dérivée et d'une anticipation en accélération. Il s'écrit donc :

$$u = q_d + K_d \ddot{e} + K_p e \quad (6)$$

En utilisant le fait que $u = \ddot{q}$ dans le cas parfait, le comportement de l'erreur est alors caractérisé par l'équation suivante :

$$e'' + K_d e' + K_p e = 0 \quad (7)$$

Dans ce cas, l'erreur se comporte comme un système du second ordre. La pulsation propre ω et l'amortissement ξ sont alors réglés par les gains du correcteur :

$$\begin{cases} K_p = \omega^2 \\ K_d = 2\xi\omega \end{cases} \quad (8)$$

La présence d'un gain intégral est théoriquement inutile puisque le système asservi se comporte comme un double intégrateur. Cependant, en pratique, le gain intégral est utilisé pour diminuer l'influence des erreurs de modélisation puisque la commande en couple calculé a aussi tendance à être peu robuste face aux erreurs de modélisation.

Lorsque les erreurs de modélisation sont importantes, que ce soit à cause d'incertitudes sur les paramètres inertiels, soit à cause des charges inconnues soit à cause des frottements. L'équation de l'erreur sera donnée par la relation suivante :

$$\widehat{M}(q)u + \widehat{C}(q, \dot{q}) + \widehat{\tau}_f = \widehat{M}(q)\ddot{q} + \widehat{C}(q, \dot{q}) + \tau_f \quad (9)$$

$$\ddot{e} + k_d \cdot \dot{e} + k_p \cdot e + k_i \int_0^t e(x) dx = \widehat{M}^{-1}[(M - \widehat{M})\ddot{q} + H(q, \dot{q}) - \widehat{H}(q, \dot{q}) + \tau_f - \widehat{\tau}_f] \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Où :} \quad \ddot{e} + k_d \cdot \dot{e} + k_p \cdot e + k_i \int_0^t e(x) dx = \widehat{M}^{-1} \tau_{prt} \quad (10)$$

τ_{prt} : Couple de perturbation.

2.3. Commande adaptative

La commande adaptative a débutée dans les années 50 comme solution pour contrôler les processus fonctionnant sous des conditions et environnement variables dans le temps. Dans les années 60 plusieurs contributions de théorie de la commande ont été introduites dans le développement de la commande adaptative, comme par exemple l'approche d'état et les théories de stabilité. Au début des années 70 les différentes méthodes d'estimation ont été introduites dans la 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 permit 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 (3) représente le principe général d'un système dans une plage donnée de commande adaptative.

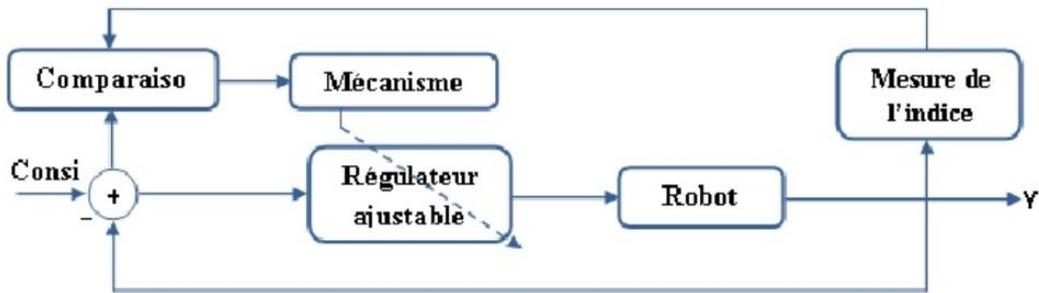


Figure 3 : Principe des systèmes de commande adaptative

3. Commande à Couple Calculé

La commande à couple calculé (Computed Torque Controller CTC) est une application spéciale de la linéarisation en boucle fermée des systèmes non linéaires. La commande CTC a été développée au début des années 70. Elle repose sur l'idée de l'annulation des termes non-linéaires de chaque axe.

Les étapes suivantes dérivent l'équation de la loi de contrôle de couple calculée [9].

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F(\dot{\theta}) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \quad (1)$$

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta} \in R^n$ dénote respectivement le vecteur position articulaire, vecteur vitesse articulaire et vecteur accélération articulaire.

$\tau \in R^n$ c'est le vecteur des couples/forces d'entrée.

$C(\theta, \dot{\theta}) \in R^{n \times n}$ représente les forces centrifuges et Coriolis.

$G(\theta)$ est le vecteur gravitationnel.

$M(\theta) \in R^{n \times n}$ la matrice d'inertie.

$$\text{On pose : } N(\theta, \dot{\theta}) = C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \Leftrightarrow \tau = M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta})$$

Si la trajectoire souhaitée $\theta(t)$ est sélectionnée pour la manipulation du bras, l'erreur de suivi est :

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta$$

En prenant la dérivée première et seconde de l'erreur

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}, \ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}$$

$e = \theta_d - \theta$ et $\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$: sont respectivement l'erreur de position articulaire et l'erreur de vitesse articulaire.

D'après (1), $\ddot{\theta}$ est donné par

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1} (\tau - N(\theta, \dot{\theta})) \quad (2)$$

En remplaçant θ de (2) dans (1) donc

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d + M(\theta)^{-1} (N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - \tau) \quad (3)$$

Définition de la fonction d'entrée de commande comme [15]

$$u = \ddot{e} = \ddot{\theta}_d + M(\theta)^{-1} (N(\theta, \dot{\theta}) - \tau) \quad (4)$$

À partir de (4), le couple articulaire calculé τ est donné par

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d - u) + N(\theta, \dot{\theta}) \quad (5)$$

Sélectionnez le signal de commande u comme rétroaction proportionnelle-dérivée (PD)

$$u = -K_D \dot{e} - K_P e \quad (6)$$

K_D et K_P sont des matrices constantes, diagonales et positives de dimension $n \times n$, n représente le degré de liberté (nombre d'articulations) .

En réglant correctement le gain proportionnel et le gain dérivé pour que l'erreur de suivi e :

$$e \rightarrow 0 \text{ à } t \rightarrow \infty.$$

En remplaçant (6) dans (5), le couple d'articulation calculé qui est l'entrée du bras du robot devient

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_D \dot{e} + K_P e) + N(\theta, \dot{\theta}) \quad (7)$$

Ce qui a appelé la loi de contrôle de couple calculée.

Après avoir calculé τ à partir de l'éq. (7) et en remplaçant sa valeur dans l'éq. (1). L'équation pour l'ensemble du système peut être dérivée de (1) et (7) par

$$\begin{aligned}
 M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) &= M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_D\dot{e} + K_P e) + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \\
 \Rightarrow \ddot{\theta} &= (\ddot{\theta}_d + K_v\dot{e} + K_p e) \\
 \Rightarrow \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + K_d\dot{e} + K_p e &= 0
 \end{aligned}$$

Donc, l'équation d'erreur en boucle fermée peut être donnée par l'équation

$$(\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e) = 0 \quad (8)$$

L'équation (23) signifie qu'il n'y a pas de perturbation externe.

Le schéma fonctionnel de la commande du couple calculée est illustré à la Figure 4.

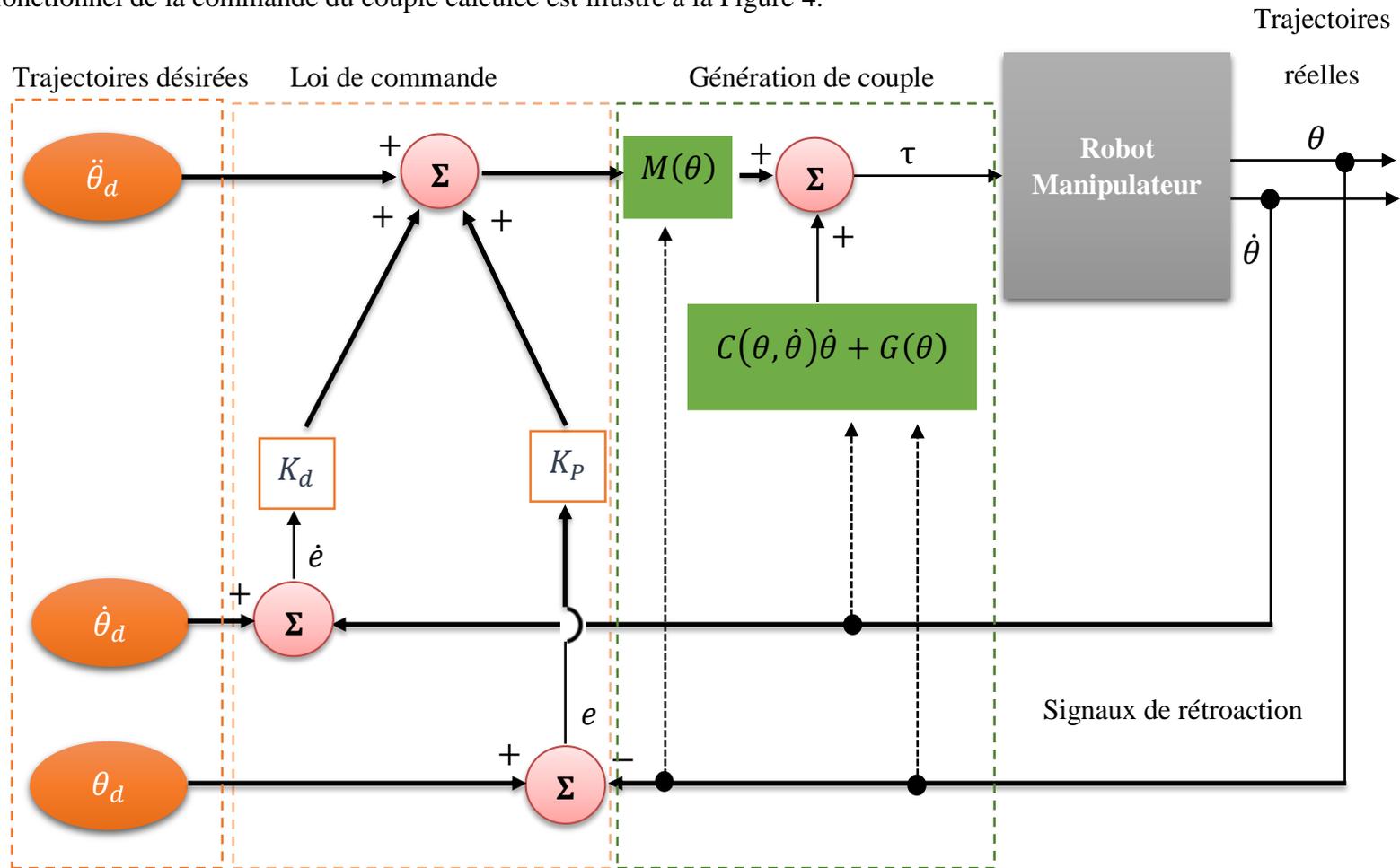


Figure 4. Organigramme de la commande du couple calculée

4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentée quelques techniques de commande des robots industriels telle que la commande classique, la commande dynamique et la commande adaptative, Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la commande classique des robots manipulateurs (CTC).

Chapitre IV

Tests et validation



1. Étude de simulation

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats de la méthode adoptée pour réaliser la commande du bras manipulateur. Qu'il y ait ou non des forces externes exercées au robot, des simulations ont été effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink pour montrer les écarts entre les états réelles et désirées des positions, vitesses, accélérations et couples des deux articulations.

2. Détermination des paramètres

Un mouvement sinusoïdal est donnée aux deux articulations comme

$$\theta_{1,d} = \cos(2\pi ft), \theta_{2,d} = \sin(2\pi ft)$$

f est la fréquence du mouvement sinusoïdal

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

Paramètre	Valeur
m_1	4Kg
m_2	1Kg
l_1	0.4m
l_2	0.5m
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	

Tableau 1 Les valeurs des paramètres utilisés lors de la simulation.

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

$$K_P = 10I_{2 \times 2} \text{ et } K_D = 10I_{2 \times 2}, \text{ où } I_{2 \times 2} \text{ représente une matrice identité de dimension } 2 \times 2.$$

3. Modèles Simulink

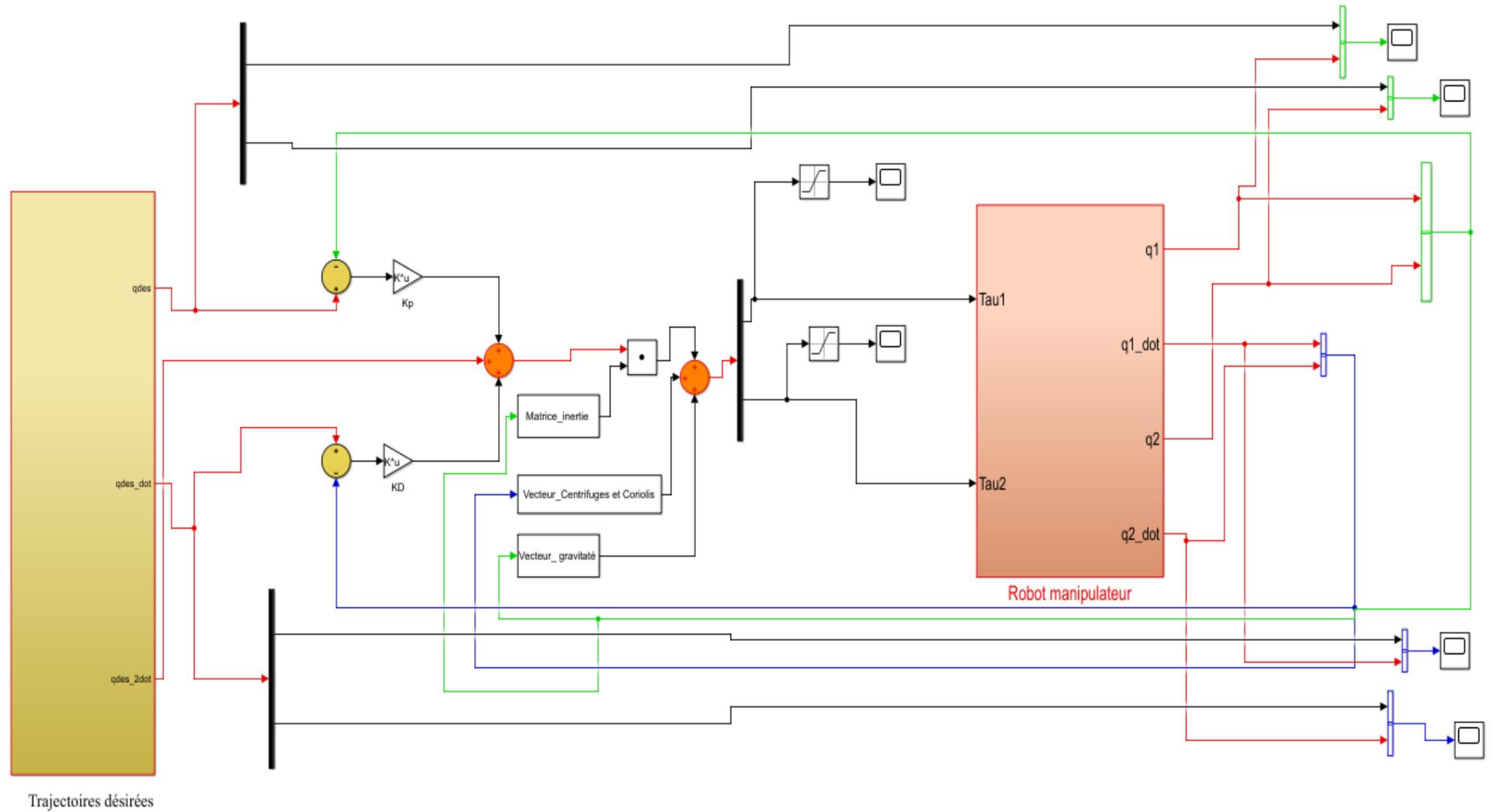


Figure 1 : Modèle Simulink de la commande CTC pour le Robot Manipulator_2 ddl

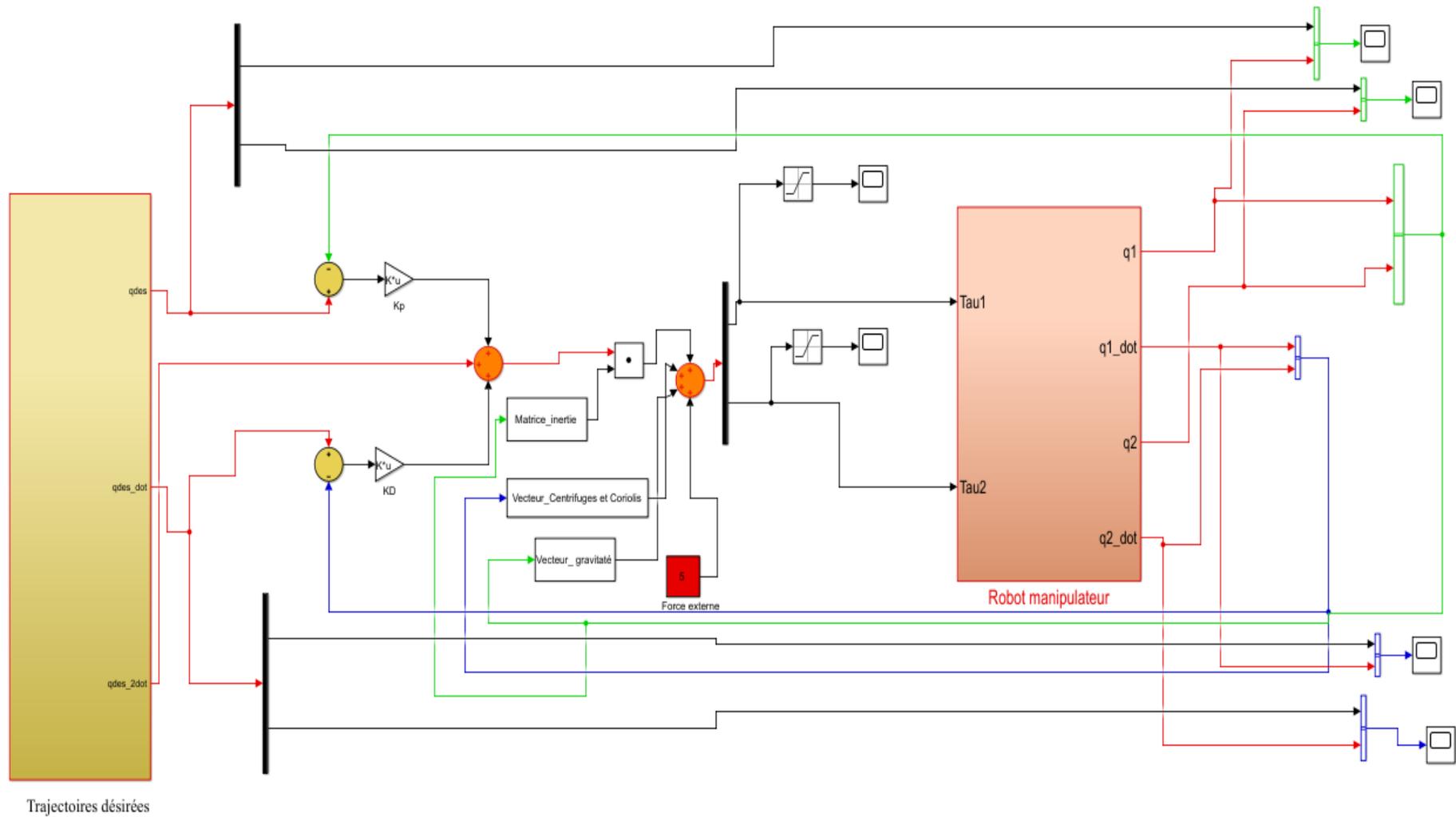


Figure 2 : Modèle Simulink de la commande CTC pour le Robot Manipulator_2 ddi Présence d'une force externe perpendiculaire au bras n° 1

4. Les résultats de simulation

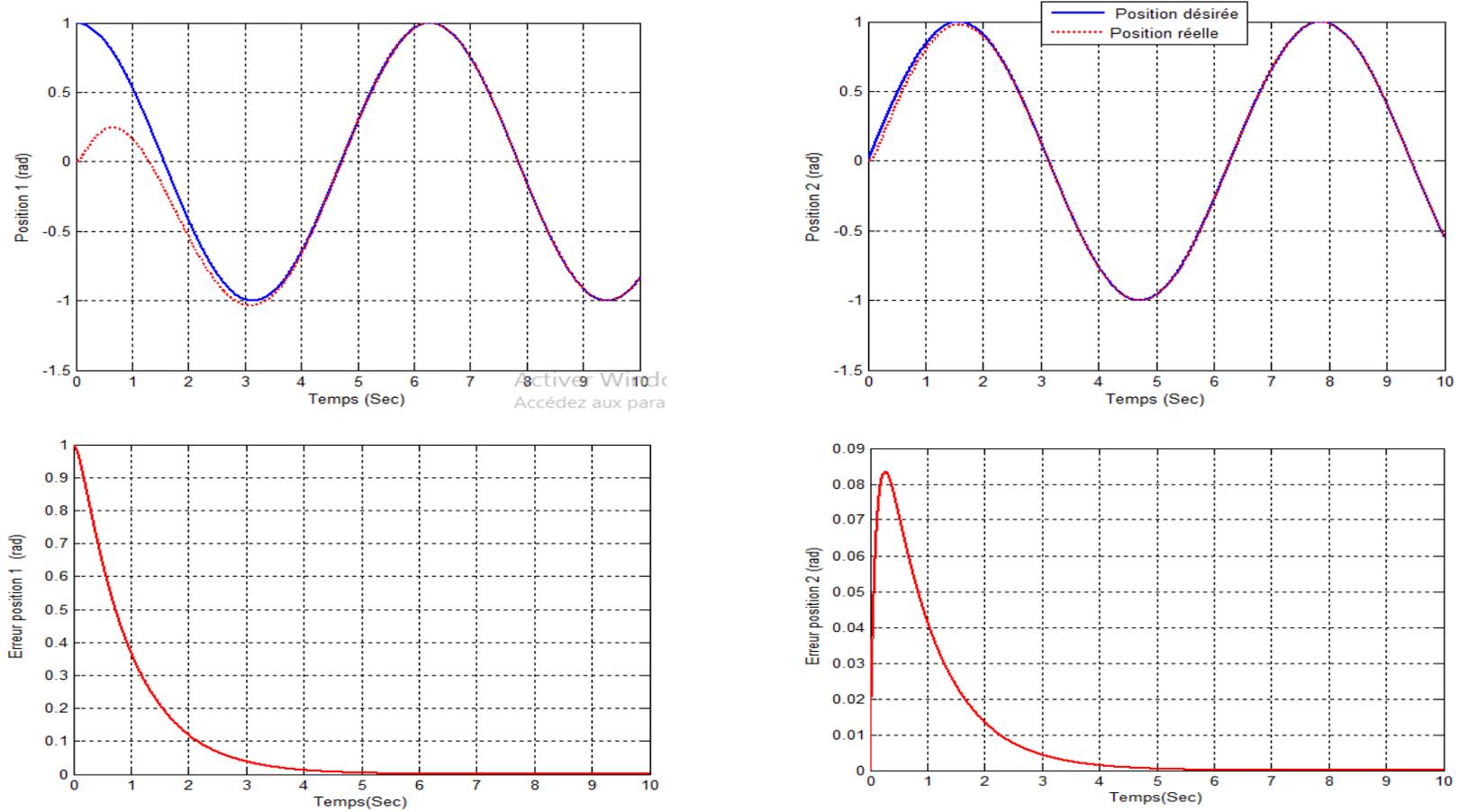


Figure 3 : Cas d'absence de forces externes : Position réelles et désirées (avec erreurs)

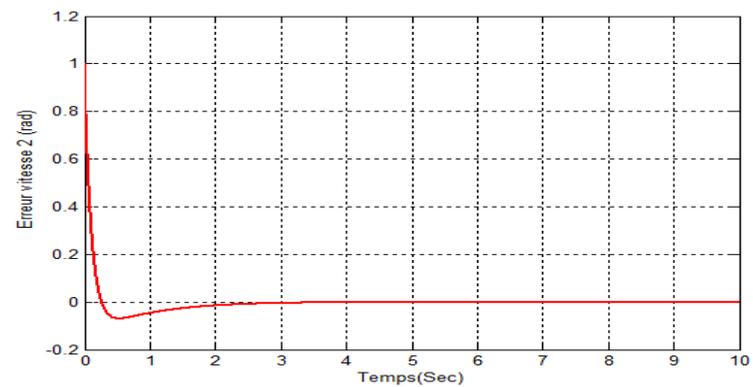
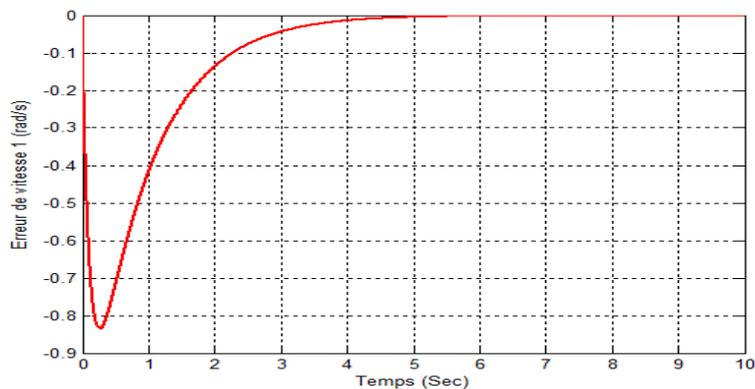
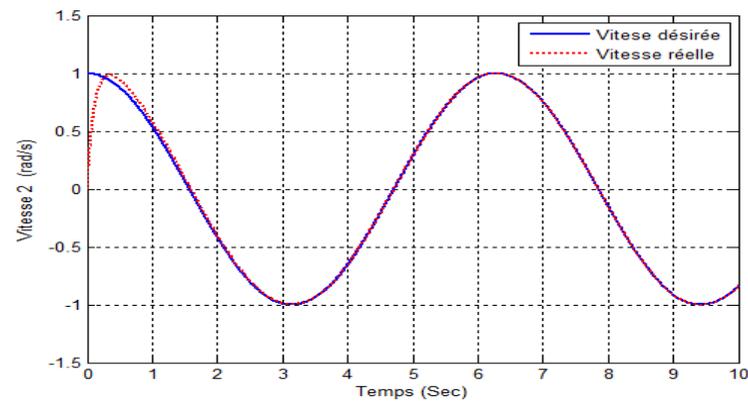
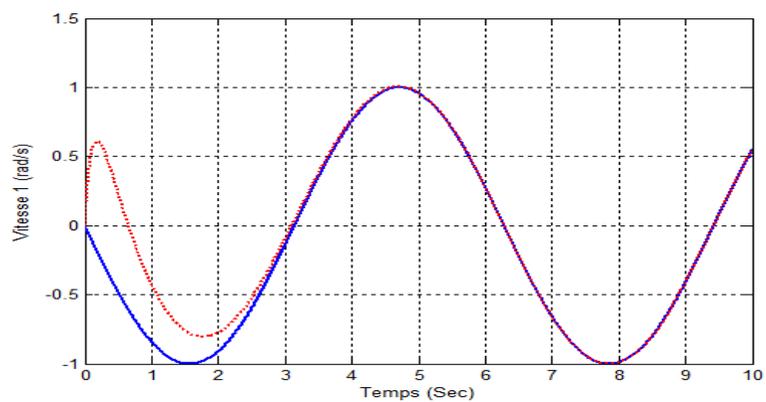


Figure 4 : Cas d'absence de forces externes : vitesses réelles et désirées (avec erreurs)

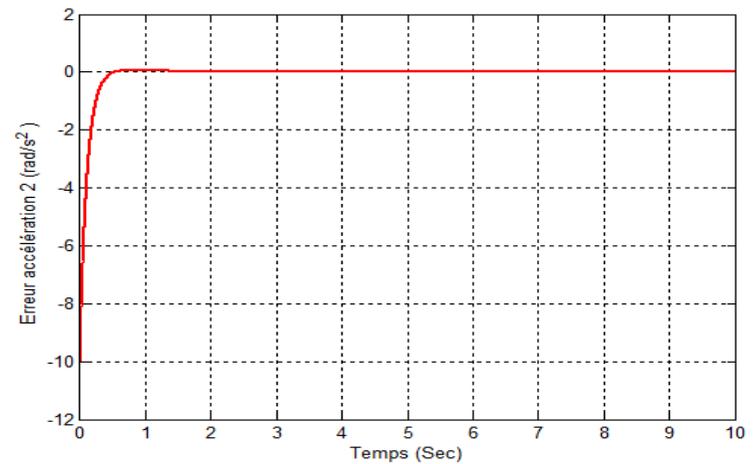
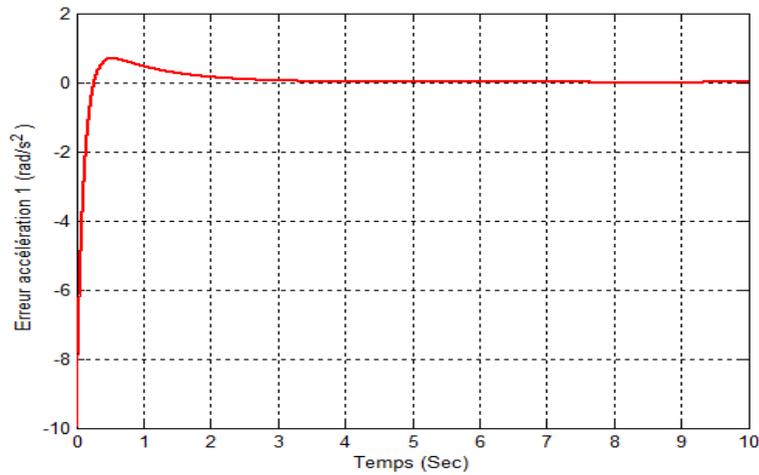
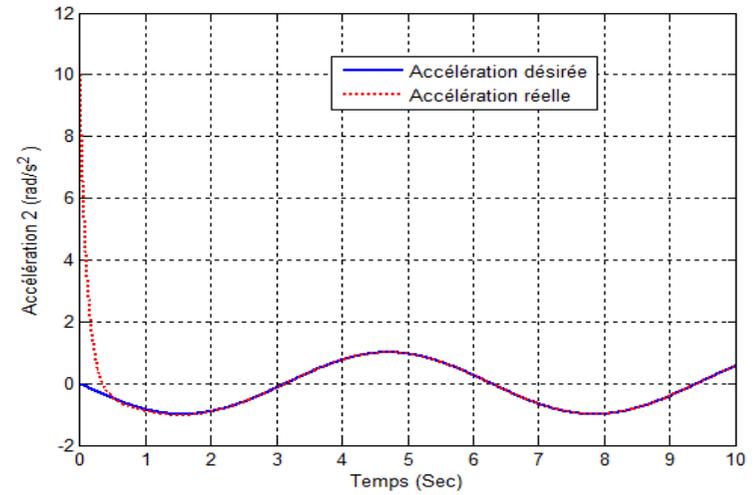
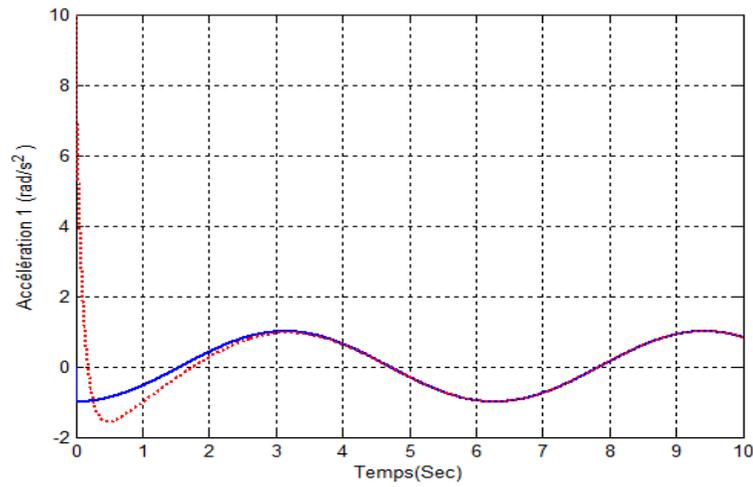


Figure 5 : Cas d'absence de forces externes : accélérations réelles et désirées (avec erreurs)

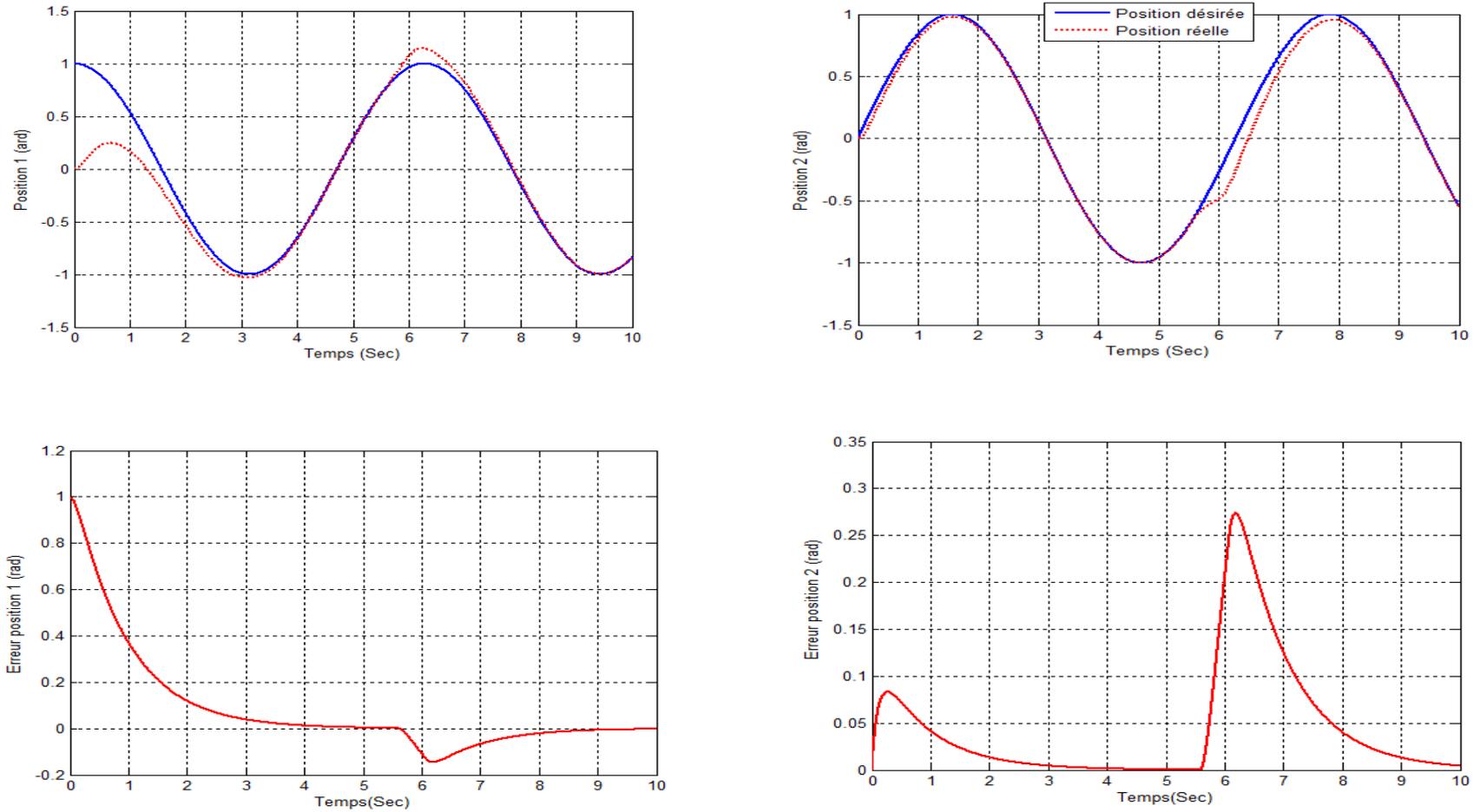


Figure 6 : Cas 2 : Présence de force externe perpendiculaire au bras n° 1 et égale à 5 N au temps = 5.6 sec.:
Position réelles et désirées (avec erreurs) .

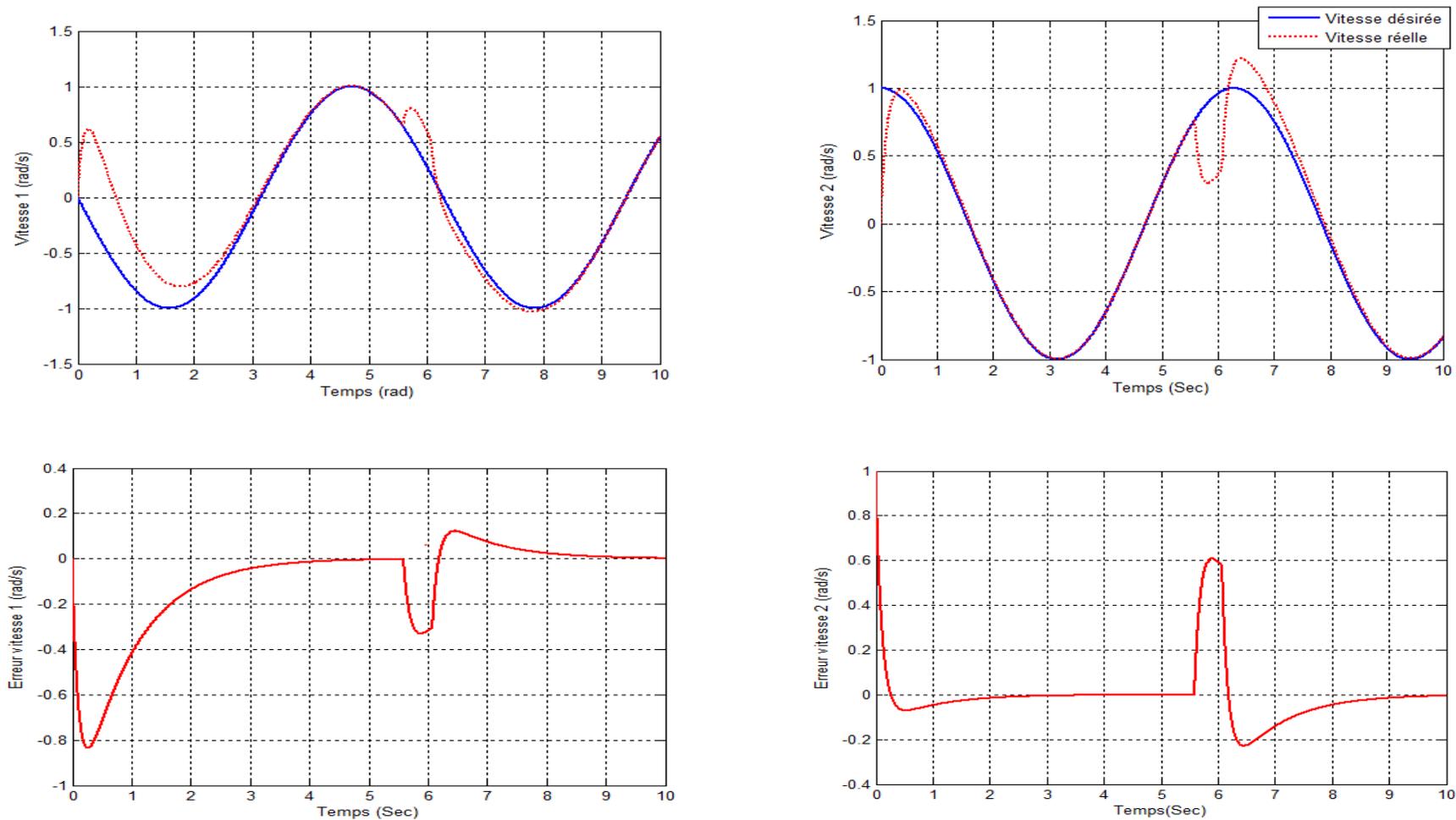


Figure 7 : Cas 2 : Présence de force externe perpendiculaire au bras n° 1 et égale à 5 N au temps = 5.6 sec: Vitesses, réelles et désirées (avec erreurs).

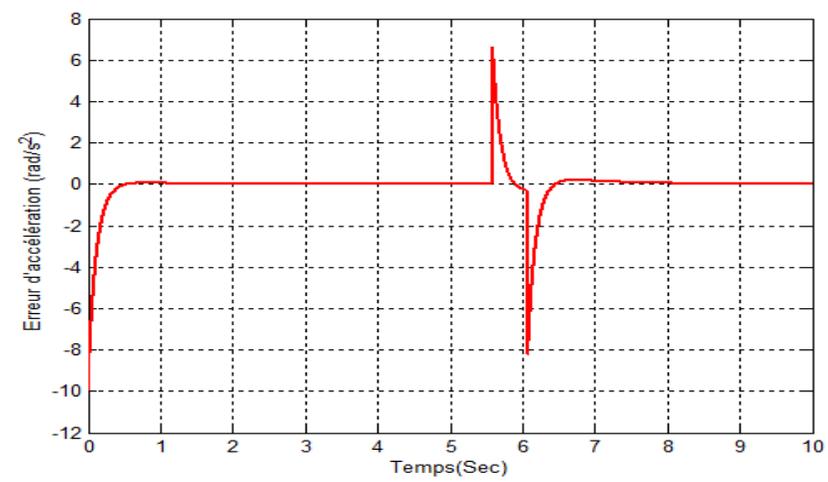
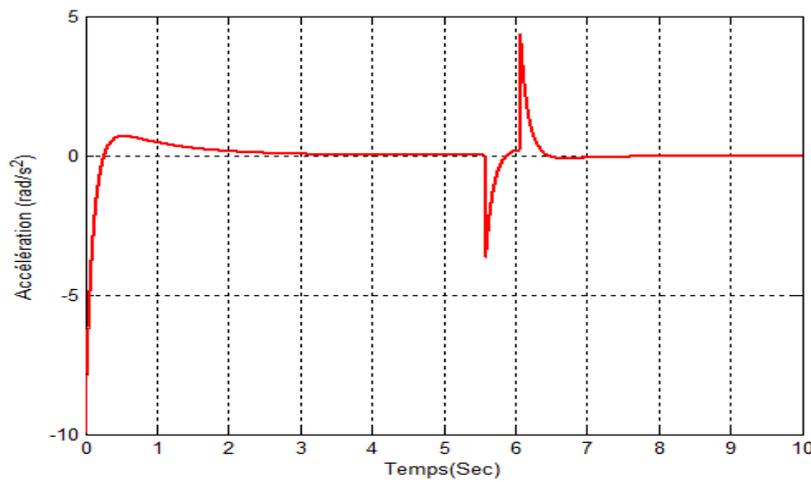
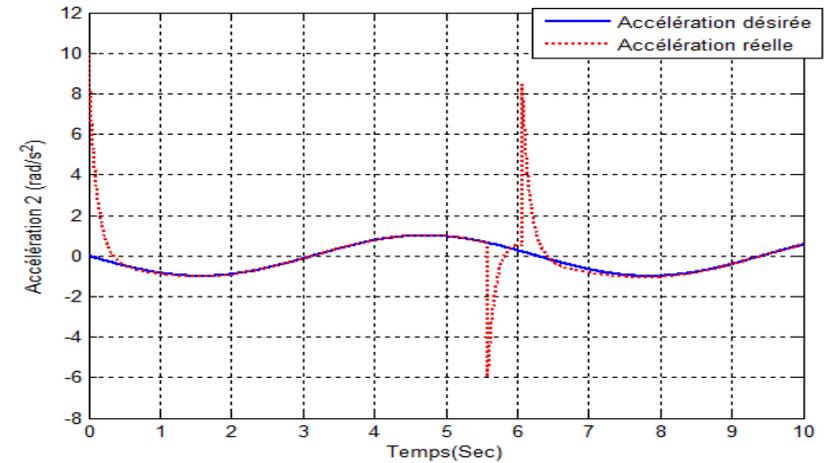
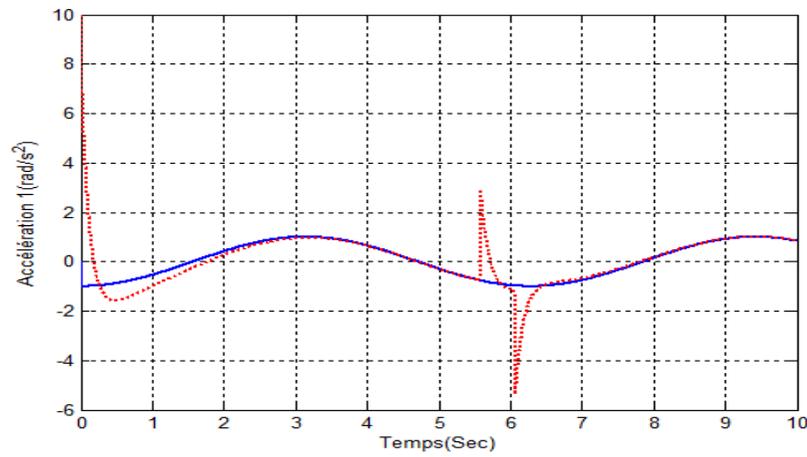


Figure 8 : Cas 2 : Présence de force externe perpendiculaire au bras n° 1 et égale à 5 N au temps = 5.6 sec: Accélérations réelles et désirées (avec erreurs) .

5. Interprétations et commentaires

Nous constatons pour les figures (3,4 ,5), que les signaux de positions, vitesses et l'accélération réelles de l'articulation suivent parfaitement les trajectoires sinusoïdales désirées et dans une période de temps, environ 3 secondes en raison de l'utilisation du contrôleur CTC (contrôleur de couple calculé) .

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

Lorsqu'il y a une force externe (une collision) ou une perturbation Figures (6,7,8), , le signal réel est affecté par cette force au moment où la force s'exerce sur la première liaison : à temps = 5.6 Sec puis le contrôleur CTC essaie de faire coïncider à nouveau le signal réel avec le signal souhaité après la fin de l'effet de force.

6. Conclusion

L'analyse est présentée dans deux cas; le premier sans collisions appliqué aux liens du manipulateur, tandis que le second est le cas appliqué en collision. Les résultats prouvent que le contrôle du couple calculé minimise efficacement l'erreur entre les signaux réels et les signaux souhaités des positions, des vitesses, des accélérations et des couples des articulations du manipulateur. De plus, le couplage dynamique entre les articulations est présenté.

Conclusion générale

La robotique est la science qui s'intéresse aux robots. En fait, il s'agit d'un domaine multidisciplinaire : on y trouve des aspects concernant la mécanique, l'informatique, l'électronique, ...

Ils sont principalement utilisés dans l'industrie pour effectuer des manipulations répétitives, surtout lorsque le processus de fabrication est fréquemment soumis à des modifications. Par exemple la soudure des composants sur les circuits imprimés, dans l'industrie électronique.

La commande du couple calculée (CTC) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

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.

Le commande de couple calculé est également présenté et une étude de simulation est exécutée en utilisant un mouvement sinusoïdal commandé simultanément aux deux articulations du manipulateur.

Les résultats prouvent que le contrôle du couple calculé minimise efficacement l'erreur entre les signaux réels et les signaux souhaités des positions, des vitesses et des accélérations et des articulations du manipulateur.

Le couplage dynamique entre les articulations du manipulateur doit être pris en compte lors de la conception et de la mise en œuvre de la méthode de détection des collisions homme-robot et de l'identification des liens en collision qui contribuent à la sécurité de l'interaction homme-robot.

Conclusion générale

Comme perspectives, nous suggérons d'étudier d'autres techniques de commande telles que la commande CTC basé sur Autodesk inventor model, la commande directe du couple par les techniques de l'intelligence artificielle,.....

Faire les simulations sous l'environnement PYTHON .

- [1] Muhammad Imran Ullah, Syed Ali Ajwad, Raza Ul Islam, Usama Iqbal and Jamshed Iqbal “Modeling and Computed Torque Control of a 6 Degree of Freedom Robotic Arm”, 2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE),Islamabad, Pakistan, April 22-24, 2014
- [2] DJOUGGANE Fadhila «ETUDE ET CONCEPTION D'UN ROBOT MANIPULATEUR POUR L'ENMTP», MÉMOIRE DE MAGISTER, Université Hadj–Lakhdar Batna 2012.
- [3]KHABER AICHA, «Etude et simulation d'un robot manipulateur (Kawasaki FS03N)», mémoire de magister, UNIVERSITE DU DJILALI BOUNAAMA Khemis Miliana 2019.
- [4] ARBOUCHE Kaddour, «Commande Adaptative Des Robots Manipulateurs Rigides», Mémoire du Projet de Fin d'Etude, université Djilali Bounaama Khemis Miliana 2015.
- [5] RAHLI Boubaker et ADJABI Kamel, «Etude et adaptation d'un bras manipulateur En traitement d'image à trois degrés De liberté», Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [6] Professeur Jean-Louis Boimond, cour« robotique», Université Angers
- [7] Achour halim et Mohamed seghir mounir, «Conception et realisation d'un bras manipulateur a 3 degré de liberté», mémoire master, université Blida 2017
- [8] Mme S.BORSALI, cours «modélisation des robots», université Tlemcen 2012
- [9]Abdel-Nasser Sharkawy,Panagiotis N. Koustoumpardis “Dynamics and Computed-Torque Control of a 2-DOF manipulator: Mathematical Analysis” , International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 28, No. 12, (2019), pp. 201-212
- [10] Zoran Gajic. “ *Linear Dynamic Systems and Signals*”, Prentice Hall 2003.