

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Mémoire de Master en Automatique

Thème :

COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'ORDRE
SUPERIEUR D'UN ROBOT PLANAIRE A
QUATRE CABLES.

AHMED YAHIA Salheddine.

Sous la direction de Mr **Dr. Messaoud CHAKIR**

Présentée et soutenue publiquement le 29/06/2017

Composition du Jury

Président	Mr. Mohamed BOUCHERIT	Professeur	ENP
Promoteur	Mr. Messaoud CHAKIR	MC/B	ENP
Examineur	Mr. Mohamed TADJINE	Professeur	ENP

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Mémoire de Master en Automatique

Thème :

COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'ORDRE
SUPERIEUR D'UN ROBOT PLANAIRE A
QUATRE CABLES.

AHMED YAHIA Salheddine.

Sous la direction de Mr **Dr. Messaoud CHAKIR**

Présentée et soutenue publiquement le 29/06/2017

Composition du Jury

Président	Mr. Mohamed BOUCHERIT	Professeur	ENP
Promoteur	Mr. Messaoud CHAKIR	MC/B	ENP
Examinateur	Mr. Mohamed TADJINE	Professeur	ENP

ENP 2017

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À mes parents qui me sont les plus chers au monde, que Dieu les protège,
et que ce travail fasse qu'ils soient fiers de moi.*

A mes sœurs Amina, Asma, Chaima, Rachida et Kawther.

A tout ma grand famille de proche ou du loin.

À tous mes amis chacun par son nom.

*A tous les membres de groupe El-Bachir El-Ibrahimi de scouts musulman
algérienne —Boumedfaa-.*

À tous mes professeurs et camarades chacun avec son nom.

A mon ami et binôme CHAIF Wedi et toute sa famille.

AHMED YAHIA Salah Eddine

REMERCIEMENTS

Dieu merci,

Le travail est terminé et le moment le plus agréable est arrivé, la rédaction de mes remerciements. Je vais profiter de ces quelques lignes pour exprimer mes sincères reconnaissances à l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné de près ou d'un peu plus loin tout au long de ce projet fin d'étude.

*En premier lieu, je tiens à adresser mes remerciements aux Messieurs **Mesaaoud Chakir** et **Tadjine Mohamed**, mes encadreur, pour leurs conseils précieux et la liberté qu'ils m'ont laissée tout au long de mes travaux.*

Ensuite, je remercie très chaleureusement mes professeurs de l'école nationale qui nous ont tant donné tout au long de mon cursus.

*Je remercie Monsieur **R.Houl** de m'avoir fait l'honneur de présider les jurys de soutenance, ainsi que Messieurs **H.Chkireb** et **O.Stihi**.*

Et pour finir, je remercie mes parents qui m'ont toujours soutenu ainsi que mes amis (ils se reconnaîtront) que je n'ai pas pu voir autant que je le souhaitais, mais qui ont su me faire comprendre qu'ils étaient toujours là.

ملخص:

يتناول هذا العمل الروبوت الذي ينتمي إلى الروبوتات موازية، ويستخدم كابلات بدلا من المفاصل المتصلبة، وحركته في مساحة العمل مستوية. ويسمى الروبوت الروبوت مستو مواز مع أربعة كابلات.

ساعدت النمذجة دراسة السلوك الديناميكي للروبوت وأكدت على ضرورة المراقبة في حلقة مغلقة. التحكم عن طريق وضع الإنزلاق من الدرجات العليا تقنيات جيدة جدا للسيطرة على هذه الأنواع من الروبوتات

كلمات مفتاحية: الروبوت مواز، الروبوت المتوازي مع أربعة كابلات، النمذجة، التحكم، وضع الإنزلاق من الدرجات العليا.

Abstract:

This work deals with the robot that belongs to parallel robots, it uses cables instead of rigid joints, and has a planar motion in the workspace. The robot is called a planar parallel robot with four cables.

The modeling allowed to study the dynamic behavior of the robot and validated the need for a closed loop control; The command by sliding mode of higher order is a very good techniques for the control of these types of robots.

Keywords: parallel robot, parallel robot with four cables, modeling, control, higher order sliding mode.

Résumé :

Ce travail porte sur le robot qui appartient aux robots parallèles, il utilise des câbles à la place des articulations rigides, et a un mouvement planaire dans l'espace de travail. Le robot est appelé robot parallèle planaire à quatre câbles.

La modélisation permis d'étudier le comportement dynamique du robot et validé la nécessité d'une commande en boucle fermée ; la commande par mode glissant d'ordre supérieur est une très bon techniques pour la commande de ces types de robots.

Mots-clés: robot parallèle, robot parallèle avec quatre câbles, modélisation, commande, mode glissant d'ordre supérieur.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	6
Chapitre 1: MODELISATION DU ROBOT PLANAIRE A 4 CABLES.....	7
1.1 Introduction.....	8
1.2 Modélisation géométrique.....	8
1.2.1 Modelé géométrique Inverse.....	9
1.2.2 Modèle géométrique Direct.....	10
1.3 Modélisation Cinématique.....	10
1.3.1 Modèle Cinématique Inverse.....	11
1.3.2 Modèle Cinématique Direct.....	12
1.4 Modèle Dynamique.....	12
1.4.1 Modèle dynamique de l'effecteur.....	12
1.4.2 Structure mécanique des moteurs.....	13
1.4.3 Modèle dynamique du système.....	14
1.5 La représentation d'état du système.....	16
1.6 Simulation du la réponse du robot.....	17
1.6.1 La réponse indicielle.....	18
1.6.2 La réponse impulsionnelle.....	18
1.6.3 Réponse sinusoïdale.....	19
1.7 Génération d'une trajectoire au robot en boucle ouvert.....	19
1.8 Conclusion.....	22
Chapitre 2 : COMMANDE EN BOUCLE FERMEE.....	23
2.1 Introduction.....	24
2.2 Technique de commande par mode glissant d'ordre un.....	24
2.2.1 Introduction à la commande par mode glissant.....	24
2.2.2 Régime glissant idéal.....	24
2.2.3 Régime glissant réel.....	25
2.2.4 Conception de la commande par mode glissant.....	25
2.2.5 Choix de la surface de glissement.....	25
2.2.6 Calcul de la loi de commande.....	26
2.3 La commande par mode glissant du robot planaire a 4 câbles.....	27
2.3.1 Synthèse de la commande par mode glissant.....	27
2.3.2 Simulation de la commande par mode glissant.....	28
2.3.3 Le phénomène de broutement ou Chattering.....	30
2.3.4 Simulation des trajectoires.....	32
2.4 Technique de commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	34
2.4.1 Introduction à la commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	34
2.4.2 Mode glissant d'ordre deux.....	34
2.4.3 Exemples de commandes par modes glissants d'ordre 2.....	35
2.4.3.1 Algorithme du Twisting (TWG).....	36
2.4.3.2 Algorithme du super-Twisting.....	36
2.4.4 Exemples de commandes par Mode glissant d'ordre arbitraire.....	36
2.4.4.1 Algorithme de Levant.....	37

2.4.4.2	Algorithme de la commande quasi-continue (QC).....	37
2.4.5	Suppression du phénomène de chattering.....	38
2.5	La commande par mode glissant d'ordre supérieur du robot planaire a 4 câbles.....	38
2.5.1	Synthèse de la commande par mode glissant d'ordre deux.....	38
2.5.2	Simulation du la commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	38
2.5.3	Simulation des trajectoires.....	40
2.6	Conclusion.....	42
<hr/> CONCLUSION GENERALE.....		43
<hr/> Bibliographie.....		44
<hr/>		

Introduction générale

Les robots à câbles (appelés robots suspendus par câble et robots à fils aussi) sont un type de robots parallèles dont des câbles flexibles sont utilisés comme des articulations, une extrémité de chaque câble est roulée autour d'un rotor tordu par un actionneur, et l'autre extrémité est reliée à un effecteur, les câbles sont beaucoup plus légers que les articulations rigides d'un robot en série ou parallèle, l'analyse dynamique des robots à câble n'est pas la même que celle d'autres robots parallèles car les câbles ne peuvent que tirer l'effecteur, ils ne peuvent pas le pousser. Par conséquent, le robot à câble ne peut pas effectuer une tâche que si la force dans tous les câbles n'est pas négative. La redondance joue un rôle clé dans la conception des robots à câble, alors pour assurer que l'effecteur suive des trajectoires prédéfinies il faut que les câbles restent sous tensions.

Dans le cadre de continuation des travaux sur le robot planaire à 4 câbles au niveau de Laboratoire de Commande des Processus (LCP), l'objectif de ce travail est l'implémentation de la commande par mode glissant d'ordre un et d'ordre supérieur.

Ce mémoire est organisé en deux chapitres, le premier chapitre présentons la modélisation du robot planaire à 4 câbles, cette modélisation comporte trois types ; les modèles géométriques directe et inverse, les modèles cinématiques directe et inverse et le modèle dynamique. Et on établissant la représentation d'état, les différentes réponses du robot planaire à 4 câbles

Dans le deuxième chapitre on a étudié la commande en boucle fermée qui comporte deux techniques de commandes ; par mode glissant d'ordre un et commande par mode glissant d'ordre supérieur.

Chapitre 1 :

**MODÉLISATION DU
ROBOT PLANAIRE À
4 CÂBLES**

1.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter la modélisation du robot parallèle planaire à 4 câbles car la modélisation est la 1^{ère} étape qu'il faut faire pour établir la commande du robot, et on va représenter le modèle géométrique direct et inverse, cinématique et dynamique du robot à quatre câbles permettant de réaliser un mouvement plan (2 ddl), on représente le système sous la forme d'une représentation d'état pour valider le modèle dynamique et étudier la stabilité du robot planaire a 4 câbles avec la simulation des différentes réponses (impulsionnelle et indicielle) du système en boucle ouverte,

La structure mécanique de ce robot est constituée de :

- Une base (cadre) fixe de forme carrée ; chaque câble est lié à la base par un actionneur (moteurs/poulies).
- Une plateforme mobile, qui porte l'organe terminal.
- La base et la plateforme mobile sont reliées par quatre câbles.
- Chaque câble est lié à la base par un actionneur (moteurs/poulies).

La figure (1.1) illustre la structure mécanique du robot.

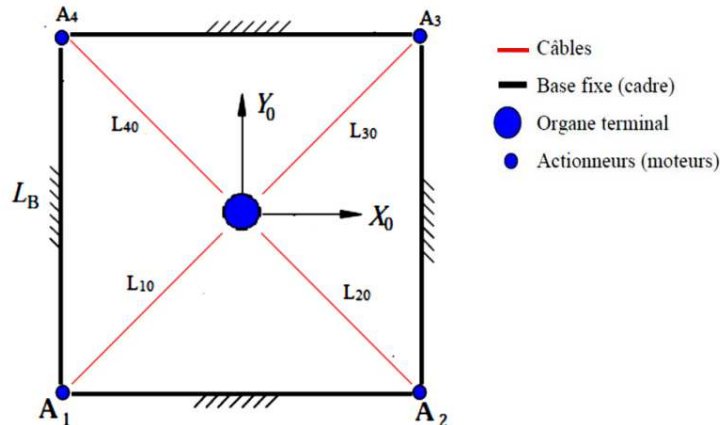


Figure 1.1 : Structure mécanique du robot planaire à 4 câbles.

Cette modélisation représente les transformations (ou les relations) entre l'espace opérationnel (dans lequel on définit la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel on définit la configuration des articulations du robot).

1.2 Modélisation géométrique

Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.

La figure (1.2) nous montre l'organe terminal dans la position (x, y) et les différentes longueurs des câbles (L_i) ainsi que les angles que font ces derniers avec l'axe des x (θ_i).

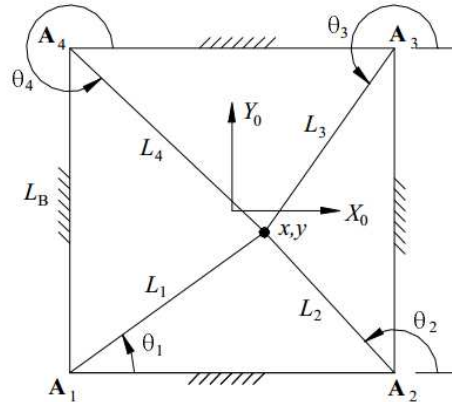


Figure 1.2 : Diagramme du robot planaire a 4 câbles [1].

1.2.1 Modelé géométrique Inverse

Le modelé géométrique Inverse Consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'elle existe la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles (il y a rarement unicité de solution) constitue ce que l'on appelle le modèle géométrique inverse (MGI) [10].

On cherche à trouver les longueurs des câbles (L_i) et les angles (θ_i) en fonction des coordonnées de l'effecteur (x, y) , exprimées par les équations suivantes :

$$L_i = \sqrt{L_{ix}^2 + L_{iy}^2} \quad i = 1,4 \quad (1.1)$$

Avec :

$$L_{ix} = x - A_{ix} \quad \text{et} \quad L_{iy} = y - A_{iy} \quad i = 1,4 \quad (1.2)$$

On remplace dans l'équation(2.1) on trouve :

$$L_i = \sqrt{(x - A_{ix})^2 + (y - A_{iy})^2} \quad i = 1,4 \quad (1.3)$$

Pour les angles on a :

$$\theta_i = \arctang \left(\frac{y - A_{iy}}{x - A_{ix}} \right) \quad i = 1,4 \quad (1.4)$$

1.2.2 Modèle géométrique Direct

Le modèle géométrique direct d'un robot permet de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires [10].

Donc on exprime la position de l'effecteur (x, y) en fonction des longueurs des câbles (L_i) , le modèle géométrique directe est difficile à résoudre à cause de sa structure fermée (les angles (θ_i) sont liés avec les longueurs des câbles (L_i)).

Ce problème peut être simplifié en déplaçant le repère $R(O, X, Y)$ au point A_1 ce qui nous donne de nouvelles coordonnées des points $A_1 = (0, 0)$ et $A_2 = (L_b, 0)$, comme montre la figure (1.3). Alors la solution du modèle géométrique direct est l'intersection de deux cercles, un de centre A_1 avec un rayon L_1 , et l'autre de centre A_2 de rayon L_2 :

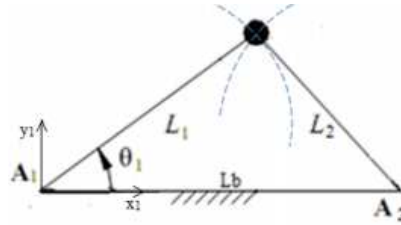


Figure 1.3 : Le changement de repère pour la calculé du modelé cinématique.

$$x_1^2 + y_1^2 = L_1^2 \quad (1.5a)$$

$$(L_b - x_1)^2 + y_1^2 = L_2^2 \quad (1.5b)$$

$$(L_b - x_1)^2 - x_1^2 = L_1^2 - L_2^2 \quad (1.5c)$$

$$2x_1L_b - L_b^2 = L_1^2 - L_2^2 \quad (1.5d)$$

D'où :

$$\begin{cases} x = \frac{L_b^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_b} \\ y = \pm \sqrt{L_b^2 - (L_b - x)^2} = \pm \sqrt{L_1^2 - x^2} \end{cases} \quad (1.6)$$

1.3 Modélisation Cinématique

La modélisation cinématique d'un robot en général permet d'établir les relations entre les vitesses articulaires (généralisées) et les vitesses opérationnelles de l'organe terminal.

Dans cette partie nous présentons la modélisation cinématique inverse et directe du robot plan à 4 câbles [10].

1.3.1 Modèle Cinématique Inverse

Pour calculer le modèle cinématique inverse, nous considérons le i^{emme} vecteur obtenu des équations (1.2):

$$x = A_{ix} + L_i \cos(\theta_i) \quad i = 1,4 \quad (1.7a)$$

$$y = A_{iy} + L_i \sin(\theta_i) \quad i = 1,4 \quad (1.7b)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{ix} + L_i \cos(\theta_i) \\ A_{iy} + L_i \sin(\theta_i) \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Si on dérive $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ par rapport au temps, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -L_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & -L_i \sin(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{L}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} \quad i = 1,4 \quad (1.9)$$

En inversant l'équation (2.9) on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{L}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ \frac{-\cos(\theta_i)}{L_i} & \frac{-\sin(\theta_i)}{L_i} \end{pmatrix} \quad i = 1,4 \quad (1.10)$$

Comme nous nous intéressons à les vitesses des câbles en fonction de la vitesse de l'effecteur nous pouvons extraire la première ligne de (1.10) pour obtenir :

$$\begin{pmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \\ \dot{L}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

On pose :

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{pmatrix} \quad M : \text{Jacobéenne inverse} \quad (1.12)$$

1.3.2 Modèle Cinématique Direct

Le modèle cinématique direct d'un robot manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires.

Pour obtenir le modèle cinématique direct, on doit inverser l'équation (1.11) qui nous donne :

$$\dot{X} = M^{-1}\dot{L} \quad (1.13)$$

Donc la solution exige le calcul de la matrice Jacobienne inverse. En raison de redondance d'actionnement, M n'est pas carré mais de dimension $(4 * 2)$ ce qui nous crée un problème de calcul de M^{-1} . Alors pour résoudre ce problème, nous avons utilisé le pseudo inverse de Moore-Penrose :

$$\dot{X} = M^+\dot{L} \quad \text{Ou} \quad M^+ = (M^T M)^{-1} M^T \quad (1.14)$$

Tel que :

M^+ : Pseudo-inverse de la matrice M .

$\dot{X} = (\dot{x}, \dot{y})$: Les vitesses cartésiennes de l'effecteur.

1.4 Modèle Dynamique

Les modèles dynamiques définissent les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou les forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

L'étude dynamique du système peut se faire par différentes méthodes, On peut citer Newton-Euler, puissances virtuelles et la méthode de Lagrange.

1.4.1 Modèle dynamique de l'effecteur

Le modèle dynamique de l'effecteur est exprimé par la relation suivante :

$$m\ddot{X} = F_R \quad (1.15)$$

Tel que :

m : est la masse de l'effecteur.

\ddot{X} : est l'accélération de l'effecteur.

F_R : est la force résultante de tous les tensions des câbles appliqué sur l'effecteur.

Donc on peut écrire l'équation (1.15) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

1.4.2 Structure mécanique des moteurs

Le comportement dynamique des moteurs est exprimé par l'équation (1.17) [2]:

$$J\ddot{\beta} + C\dot{\beta} = \tau - rT \quad (1.17)$$

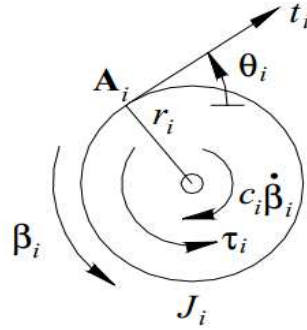


Figure 1.4 : Diagramme à corps libre pour la $i^{ème}$ poulie / arbre [2].

Tel que :

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_4 \end{pmatrix} C = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{pmatrix} \tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{pmatrix} T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

J : est la matrice des inerties des moteurs.

C : est la matrice des coefficients d'amortissement visqueux.

r : Le rayon des poulies (sont identique).

τ : est le vecteur des couples fournis par les moteurs.

T : est le vecteur des tensions des câbles.

Alors on peut extraire la relation suivante :

$$T = \frac{1}{r} (\tau - J\ddot{\beta} - C\dot{\beta}) \quad (1.19)$$

1.4.3 Modèle dynamique du système

Le modèle dynamique global du système est obtenu par combinaison entre le modèle dynamique de l'organe terminal et le modèle dynamique des moteurs [2]. Si on considère que les angles des poulies sont nuls quand la position de l'organe terminal est au centre de la carre $X = (0 \ 0)^T$, on a aussi :

$$L_{10} = L_{20} = L_{30} = L_{40} = \frac{L_b\sqrt{2}}{2} \quad (1.20)$$

La relation entre les angles des rotations (β_i) des poulies de rayon (r) et les variations des longueurs des câbles (ΔL_i) est :

$$\beta_i r = \Delta L_i \quad \text{Avec} \quad \Delta L_i = L_i - L_{i0} \quad (1.21)$$

Tel que :

$$L_i = \sqrt{(x - A_{ix})^2 + (y - A_{iy})^2} \quad i = 1,4 \quad (1.22)$$

Alors :

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} L_{10} - L_1 \\ L_{20} - L_2 \\ L_{30} - L_3 \\ L_{40} - L_4 \end{pmatrix} \quad (1.23)$$

En dérivant par rapport au temps l'équation(2.53) on obtient les vitesses angulaires des poulies :

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{r} \begin{pmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \\ \dot{L}_4 \end{pmatrix} = -\frac{1}{r} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

En dérivant par rapport au temps l'équation (1.24) on obtient les accélérations angulaires des poulies :

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{r} \left[\begin{pmatrix} -\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ -\dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ -\dot{\theta}_3 \sin(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ -\dot{\theta}_4 \sin(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} \right] \quad (1.25)$$

D'où :

$$T = \frac{1}{r} \left[\tau - J \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \dot{X}} \right) \dot{X} + \frac{\partial \beta}{\partial X} \ddot{X} \right) - C \left(\frac{\partial \beta}{\partial X} \dot{X} \right) \right] \quad (1.26)$$

Avec :

$$\dot{\beta} = \frac{\partial \beta}{\partial X} \dot{X} \quad (1.27)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta}{\partial X} \right) \dot{X} + \frac{\partial \beta}{\partial X} \ddot{X} \quad (1.28)$$

On a la relation statique $F_R = ST$ entre les tensions des câbles et les forces effectrices de l'extrémité.

Tel que :

$$S(X) = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1) & -\cos(\theta_2) & -\cos(\theta_3) & -\cos(\theta_4) \\ -\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_3) & -\sin(\theta_4) \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

Enfin, en combinant les équations(1.16),(2.17) et la relation statique $F_R = ST$, nous obtenons les équations dynamiques globales du mouvement [17], exprimées dans une forme cartésienne standard pour les systèmes robotiques :

$$M(X)\ddot{X} + N(X, \dot{X})\dot{X} = S(X)\tau \quad (1.30)$$

Avec :

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} N = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

Tel que :

$$M_{11} = r * m + \frac{1}{r} (J_1 \cos^2(\theta_1) + J_2 \cos^2(\theta_2) + J_3 \cos^2(\theta_3) + J_4 \cos^2(\theta_4)) \quad (1.32a)$$

$$M_{12} = \frac{1}{r} (J_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1) + J_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) + J_3 \cos(\theta_3) \sin(\theta_3) + J_4 \cos(\theta_4) \sin(\theta_4)) \quad (1.32b)$$

$$M_{22} = r * m + \frac{1}{r} (J_1 \sin^2(\theta_1) + J_2 \sin^2(\theta_2) + J_3 \sin^2(\theta_3) + J_4 \sin^2(\theta_4)) \quad (1.32c)$$

$$N_{11} = \frac{1}{r} [\cos(\theta_1) (C_1 \cos(\theta_1) - 2J_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1)) + \cos(\theta_2) (C_2 \cos(\theta_2) - 2J_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2)) + \cos(\theta_3) (C_3 \cos(\theta_3) - 2J_3 \dot{\theta}_3 \sin(\theta_3)) + \cos(\theta_4) (C_4 \cos(\theta_4) - 2J_4 \dot{\theta}_4 \sin(\theta_4))] \quad (1.32d)$$

$$N_{12} = \frac{1}{r} [C_1 \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) + J_1 \dot{\theta}_1 (\cos^2(\theta_1) - \sin^2(\theta_1)) + C_2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) + J_2 \dot{\theta}_2 (\cos^2(\theta_2) - \sin^2(\theta_2)) + C_3 \sin(\theta_3) \cos(\theta_3) + J_3 \dot{\theta}_3 (\cos^2(\theta_3) - \sin^2(\theta_3)) + C_4 \sin(\theta_4) \cos(\theta_4) + J_4 \dot{\theta}_4 (\cos^2(\theta_4) - \sin^2(\theta_4))] \quad (1.32e)$$

$$N_{21} = N_{12} \quad (1.32f)$$

$$N_{22} = \frac{1}{r} [\sin(\theta_1) (C_1 \cos(\theta_1) - 2J_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1)) + \sin(\theta_2) (C_2 \cos(\theta_2) - 2J_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2)) + \sin(\theta_3) (C_3 \cos(\theta_3) - 2J_3 \dot{\theta}_3 \cos(\theta_3)) + \sin(\theta_4) (C_4 \cos(\theta_4) - 2J_4 \dot{\theta}_4 \cos(\theta_4))] \quad (1.32g)$$

1.5 La représentation d'état du système

Comme on a déjà vu dans la section () l'équation dynamique du robot planaire a 4 câbles donnée par :

$$M(X)\ddot{X} + N(X, \dot{X})\dot{X} = S(X)\tau \quad (1.33)$$

Tel que :

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} N = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} \quad (1.34)$$

$$S(X) = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1) & -\cos(\theta_2) & -\cos(\theta_3) & -\cos(\theta_4) \\ -\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_3) & -\sin(\theta_4) \end{pmatrix} \tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{pmatrix} \quad (1.35)$$

Alors on pose les variables d'état suivantes :

$$\begin{cases} x_1(t) = x(t) \\ x_2(t) = \dot{x}(t) \\ x_3(t) = y(t) \\ x_4(t) = \dot{y}(t) \end{cases} \quad (1.36)$$

On dérive les variables d'état par rapport au temps :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \dot{x}(t) \\ \dot{x}_2(t) = \ddot{x}(t) \\ \dot{x}_3(t) = \dot{y}(t) \\ \dot{x}_4(t) = \ddot{y}(t) \end{cases} \quad (1.37)$$

On utilise l'équation dynamique du robot on trouve :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ M_{11}\dot{x}_2(t) + M_{12}\dot{x}_4(t) + N_{11}x_2(t) + N_{12}x_4(t) = u_1(t) \\ \dot{x}_3(t) = x_4(t) \\ M_{21}\dot{x}_2(t) + M_{22}\dot{x}_4(t) + N_{21}x_2(t) + N_{22}x_4(t) = u_2(t) \end{cases} \quad (1.38)$$

Tel que :

$$U(t) = F_R = S(X)\tau = \begin{pmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \end{pmatrix} \quad (1.39)$$

Alors :

$$\begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1) \tau_1 - \cos(\theta_2) \tau_2 - \cos(\theta_3) \tau_3 - \cos(\theta_4) \tau_4 \\ -\sin(\theta_1) \tau_1 - \sin(\theta_2) \tau_2 - \sin(\theta_3) \tau_3 - \sin(\theta_4) \tau_4 \end{pmatrix} \quad (1.40)$$

Donc on peut écrire la représentation d'état du robot comme suit :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{11} & 0 & M_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & M_{21} & 0 & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -N_{11} & 0 & -N_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -N_{21} & 0 & -N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \quad (1.41)$$

On pose :

$$M_{2d} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{11} & 0 & M_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & M_{21} & 0 & M_{22} \end{pmatrix} N_{2d} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -N_{11} & 0 & -N_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -N_{21} & 0 & -N_{22} \end{pmatrix} \quad (1.42)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{pmatrix} X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} U(t) = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \quad (1.43)$$

Alors la représentation d'état s'écrit comme suit :

$$\dot{X}(t) = M_{2d}^{-1} N_{2d} X(t) + M_{2d}^{-1} B U(t) \quad (1.44)$$

Donc :

$$\dot{X}(t) = f(X) + g(X) * U(t) \quad (1.45)$$

Tel que :

$\dot{X}(t)$: est le vecteur d'état du système.

$f(X)$ et $g(X)$: sont des fonctions non linéaire.

$U(t)$: est le vecteur de commande du système.

1.6 Simulation du la réponse du robot

Dans ce paragraphe on essaie de simuler la réponse du robot planaire à 4 câbles en utilisant MATLAB, avec les conditions suivantes :

- Les inerties du rotor et de la poulie de chaque moteur $J_i = 0.0008 \text{ kg.m}^2 \quad i = 1:4$.
- Les coefficients d'amortissement visqueux de chaque arbre du moteur

$$C_i = 0.001 \text{ N.m.s} \quad i = 1:4$$

- La masse de l'organe terminale $m = 1 \text{ kg}$.
- Le rayon de la poulie de chaque moteur $r_i = 0.05 \text{ m} \quad i = 1:4$.

1.6.1 La réponse indicielle

On simule la réponse indicielle du robot avec une entrée du système fixe ($u_1 = 1N$ et $u_2 = 1N$), les figures (1.5) et (1.6) représente les profils de position du robot en boucle ouvert :

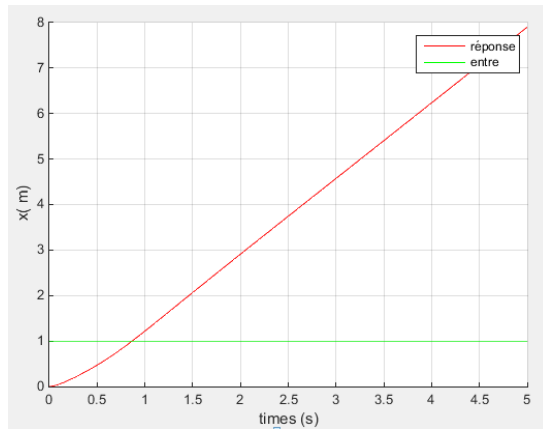


Figure 1.5 : Réponse indicielle du robot, Profil de $x(m)$.

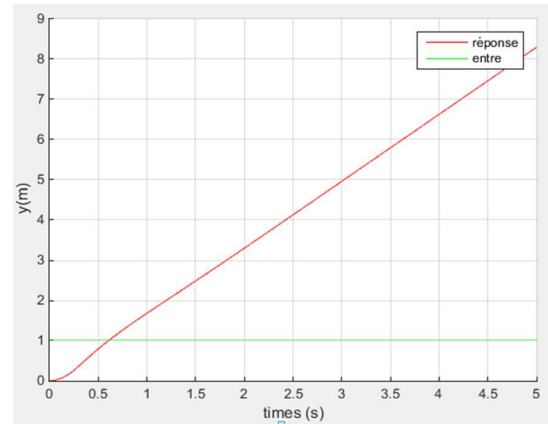


Figure 1.6 : Réponse indicielle du robot, Profil de $y(m)$.

1.6.2 La réponse impulsionnelle

On simule la réponse impulsionnelle du robot avec une entrée du système fixe ($u_1 = 1N$ et $u_2 = 1N$) pour une durée très courte, les figures (1.7) et (1.8) représentant les profils de la position du robot en boucle ouverte :

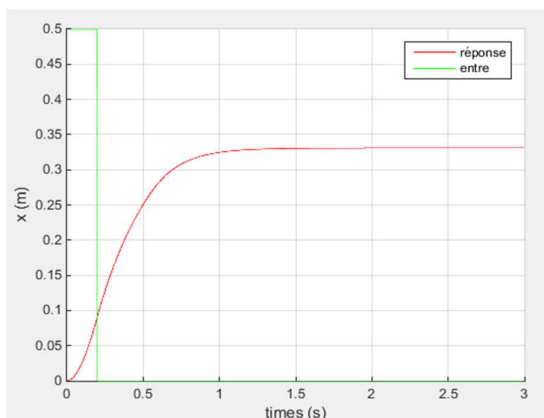


Figure 1.7 : Réponse impulsionnelle du robot, Profil de $x(m)$.

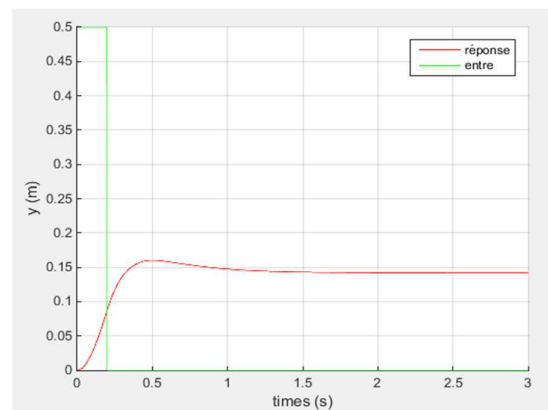


Figure 1.8 : Réponse impulsionnelle du robot, Profil de $y(m)$.

1.6.3 Réponse sinusoïdale

La simulation de la réponse sinusoïdale du robot avec une entrée du système :

$$(u_1 = \sin(t) \text{ et } u_2 = \sin(t))$$

Pour une durée très courte, les figures (1.9) et (1.10) représentent les profils de position du robot en boucle ouverte :

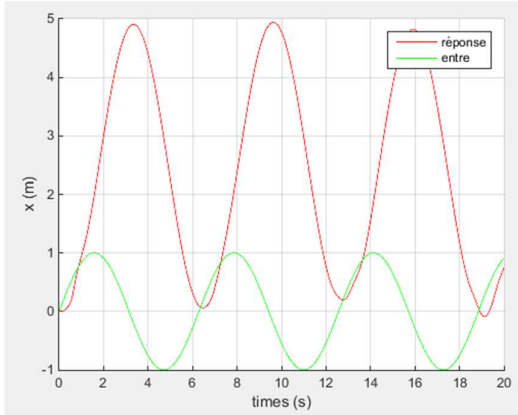


Figure 1.9 : Réponse sinusoïdale du robot, Profile de $x(m)$.

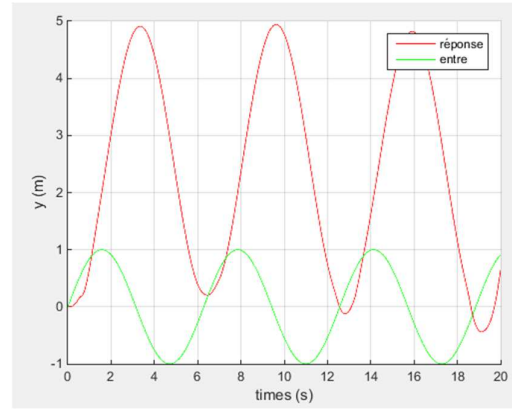


Figure 1.10 : Réponse sinusoïdale du robot, Profile de $y(m)$.

D'après la simulation de différentes réponses du robot planaire à 4 câbles on conclut que le système est instable, et qu'il est un système avec doubles intégrateur.

1.7 Génération d'une trajectoire au robot en boucle ouverte

Après la validation de la représentation d'état du robot et la simulation des différentes réponses du robot, puis après avoir calculer les couples optimaux des actionneurs, dans cette partie on essaye de commander le robot en boucle ouverte, et de générer la même trajectoire circulaire utilisé précédemment et d'autre trajectoire, la figure (3.13) donne l'organigramme de la simulation on utilise MATLAB.

Pour la trajectoire circulaire on la génère par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_r = R \cos(\varphi) \\ y_r = R \sin(\varphi) \end{cases} \quad (3.43)$$

Tel que :

$$\varphi = 2\pi \left[10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 \right] \quad (3.44)$$

Pour cet exemple de simulation on essaye de générer une cercle du centre $O(0,0)$ et d'un rayon $R = 0.2165$ m et pendant un $t_f = 1s$.

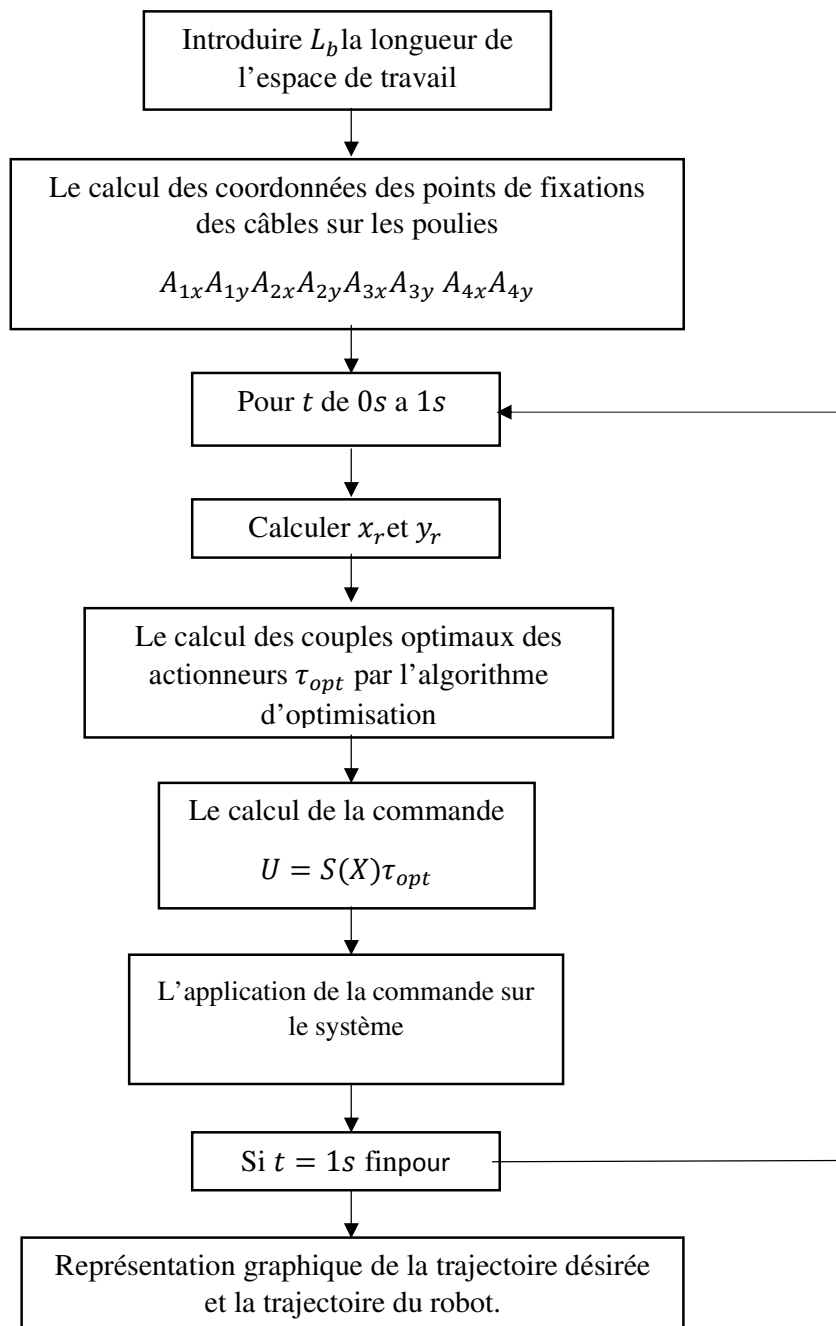


Figure 1.11 : Organigramme de la simulation du robot planaire a 4 câbles en BO.

La réponse du robot est donnée dans les figures (1.12) et (1.13) :

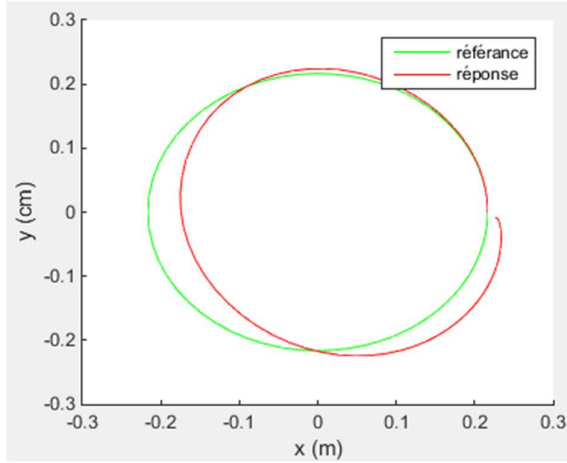


Figure 1.12 : réponse du robot a 4 câbles à un cercle pendant 1 s .

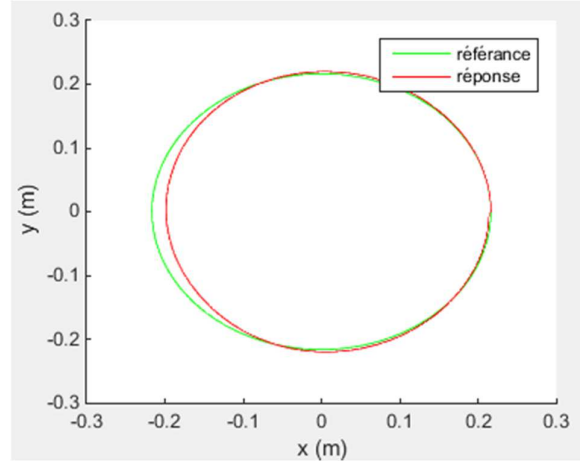


Figure 1.13 : réponse du robot a 4 câbles à un cercle pendant 5 s .

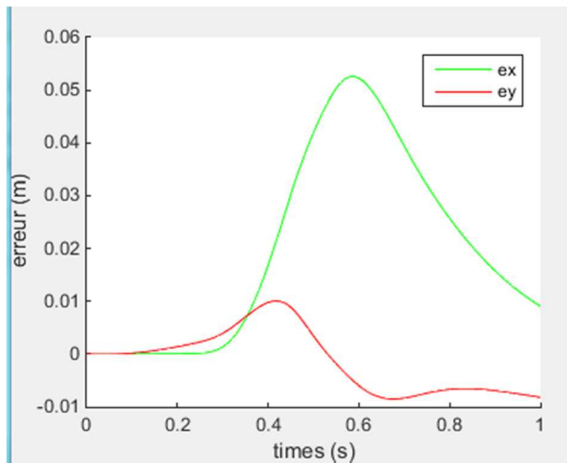


Figure 1.14 : erreur statique pour le cercle pendant 1 s .

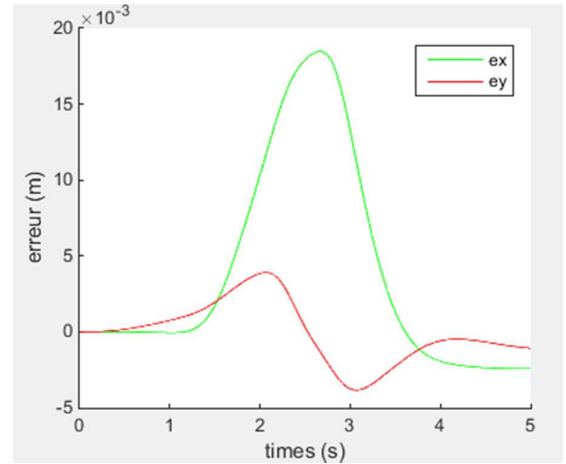


Figure 1.15 : erreur statique pour le cercle pendant 5 s .

On peut aussi ajouter d'autre trajectoire et on définit ces trajectoires comme suit :

1. **Trajectoire de Lissajous** : les équations paramétriques du cercle sont :

$$\begin{cases} x_c = R \sin(2\varphi) \\ y_c = R \cos(\varphi) \end{cases}$$

$$\text{Tel que : } R = 0.2 \text{ m} \varphi = D \left[10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 \right] D = 2\pi$$

Pour t_f on prend deux cas : $t_{f1} = 1s$ $t_{f2} = 5s$

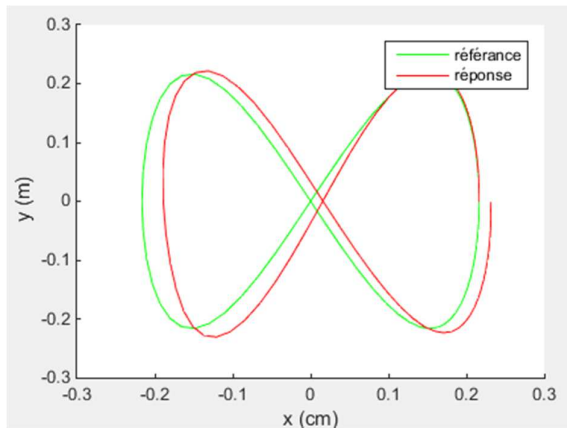


Figure 1.16 : réponse du robot a 4 câbles à une courbe de Lissajous pendant **1 s**.

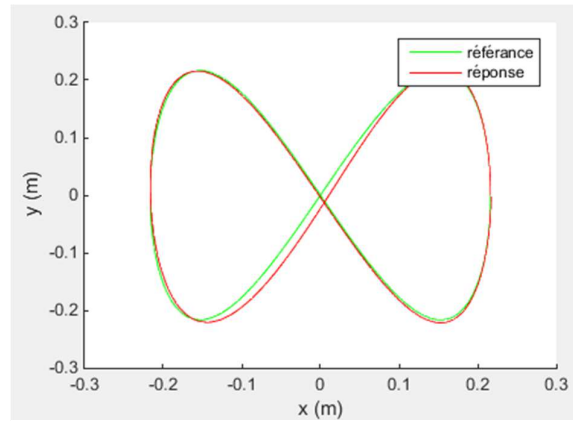


Figure 1.17 : réponse du robot a 4 câbles à une courbe de Lissajous pendant **5 s**.

Commentaire :

Les figures (1.12) et (1.13) donne la réponse du robot pendant deux différentes durées la première est pour 1s et la deuxième est pour 5s , d'après la simulation on remarque que la commande en boucle ouverte avec une trajectoire circulaire est besoin d'une commande qui assure la poursuite de la référence imposée par la trajectoire, on remarque aussi que quand on augmente la durée de la génération de la trajectoire l'erreur entre la référence et la réponse diminue (erreur statique), les figures (1.14), et (1.15) illustrent notre remarque, donc on peut constater que le temps d'exécution du trajectoire a une grande influence sur l'erreur statique.

1.8 Conclusion

Ce chapitre assure une modélisation géométrique (directe et inverse), cinématique (directe et inverse) et une modélisation dynamique du notre robot planaire à 4 câbles, après on a validé le modèle dynamique du robot planaire a 4 câbles à travers la simulation des différentes réponses (impulsionnelle, indicielle et sinusoïdale) en utilisant MATLAB, cette représentation d'état permis de passer à la commande du robot et la simulation de comportement de notre robot parallèle planaire a 4 câbles, ces résultats justifie la nécessité de la commande en boucle fermée car commande en boucle ouverte contient des erreurs statiques importantes.

Chapitre 2 :

**COMMANDE EN BOUCLE
FERMEE**

2.1 Introduction

Après qu'on a vu que le système a besoin d'une commande en boucle fermée dans le chapitre précédent, Nous allons synthétiser des lois de commande par deux techniques la 1^{er} est le mode glissant d'ordre un et la 2^{em} mode glissant d'ordre supérieur.

2.2 Technique de commande par mode glissant d'ordre un

2.2.1 Introduction à la commande par mode glissant

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commande non linéaire qui est caractérisée par la robustesse et l'efficacité. Elle consiste à commuter à l'aide des fonctions discontinues la structure du système dynamique de manière que le vecteur d'état suit une trajectoire $s(x) = 0$ dans l'espace d'état. Les objectifs principaux de cette technique de commande sont [9] :

- Synthétiser une surface de glissement de telle manière à ce que toutes les trajectoires d'état du système obéissent à un comportement désiré en termes de poursuite, de régulation et de stabilité.
- Déterminer une loi de commande ou de commutation, qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.
- Réduire le phénomène de chattering (broutement), dû à la discrétisation des fonctions de commutation.

Avant d'entamer les méthodes utilisées dans la synthèse de système de contrôle par mode de glissement, nous allons expliquer quelques notions de bases du régime glissant.

2.2.2 Régime glissant idéal

En théorie, l'organe de commutation est supposée insensible aux bruits, et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation $s(x) = 0$. Le régime glissant idéal correspond à une oscillation de fréquence infinie et d'amplitude nulle, le point représentatif de l'évolution du système glisse parfaitement sur l'hyper surface de commutation [7].

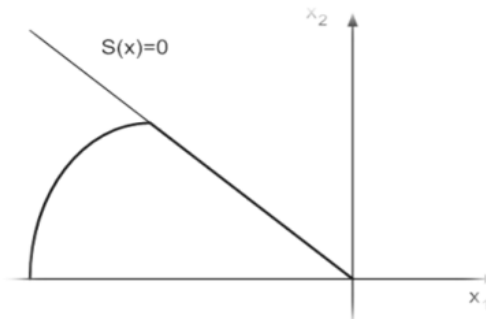


Figure 2.1 : Régime de glissement idéal [7].

2.2.3 Régime glissant réel

En pratique l'organe de commutation est réalisée à partir de relais qui présentent des imperfections comme les retards de commutations, dans ce cas la trajectoire de phase du régime glissant reste au voisinage de la surface de commutation donnant naissance à des oscillations indésirables qui éliminent la précision du système et néanmoins sa stabilité [7].

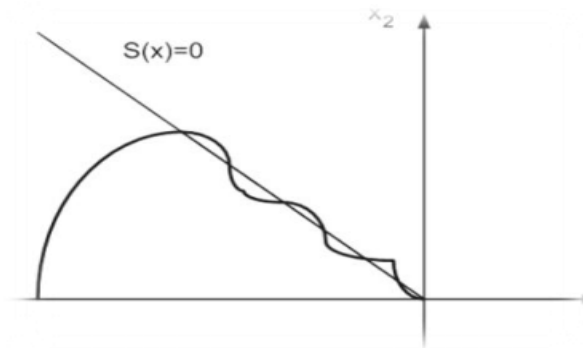


Figure 2.2 : Régime de glissement réel [7].

2.2.4 Conception de la commande par mode glissant

La conception de la commande par mode de glissant prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans cette approche. En général, pour réaliser ce type de commande trois étapes doivent être effectuées :

- Choix de la surface de glissement.
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès.
- Synthèse des lois de commande du mode glissant.

2.2.5 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé.

Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale à la vectrice erreur du vecteur d'état.

Considérons le système non linéaire défini par les équations suivantes :

$$\dot{X}(t) = f(X) + g(X)U \quad (2.1)$$

Généralement, le nombre des surfaces de glissement est choisi égal à la dimension du vecteur de commande. La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable

à régler glisse sur cette surface tende vers l'origine du plan de phase. Plusieurs formes de la surface de glissement ont été proposées dans la littérature, chacune présente des meilleures performances pour une application donnée. La surface la plus utilisée pour obtenir le régime de glissement qui garantit la convergence de l'état vers sa référence est définie par (surface de Slotine) [9] :

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{R-1} e(X) \quad (2.2)$$

Tel que :

R : Est le degré relatif au nombre qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande ; Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

λ : Est une constante positive.

$$e(X) : \text{L'erreur de poursuite définie par : } e(X) = X - X_d \quad (2.3)$$

Où X_d est la consigne désirée.

2.2.6 Calcul de la loi de commande

Une fois la surface de glissement est choisie, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à régler vers la surface, ensuite vers son point d'équilibre ; alors on aura commande lois de commande :

$$u_{MG} = u_{eq} + u_c \quad (2.3)$$

La commande équivalente u_{eq} proposée par FILIPOV et UTKIN correspond à la commande du système nominale permettant de satisfaire la condition [7] :

$$\dot{S}(X) = 0 \quad (2.4)$$

La commande de commutation u_c permettant de garantir la condition d'attractivité et responsable du glissement, la forme la plus simple que peut prendre est celle d'un relais.

$$u_c = \dot{S}(X) = -K \text{sign}(S(X)) \quad (2.5)$$

Où K est une constante positive qui représente le gain de la commande discontinue.

Alors on peut donner la forme générale de la commande par mode glissant avec la formule suivante [11] :

$$u_{MG} = \left(\frac{\partial S(X)}{\partial X} g(X) \right)^{-1} \left(-\frac{\partial S(X)}{\partial X} f(X) - K \text{sign}(S(X)) \right) \quad (2.6)$$

2.3 La commande par mode glissant d'ordre un du robot planaire a 4 câbles

2.3.1 Synthèse de la commande par mode glissant d'ordre un :

Dans cette partie et après l'étude théorique de la commande par mode glissant on essaye de synthétiser une commande par mode glissant pour le robot planaire a 4 câbles qui régit par la représentation d'état vue dans la section (1.5) et on peut écrire le système sous la forme :

$$\dot{X}(t) = f(X) + g(X)U \quad (2.7)$$

Comme le vecteur de commande est de dimension deux alors on a choisi deux surface de glissement, l'un pour x et l'autre pour y , est-on un degré relatif égale à deux ; alors les surface de glissement écrit sous la formes :

$$S(X) = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{e}_x + \lambda_1 e_x \\ \dot{e}_y + \lambda_2 e_y \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Tel que l'erreur de poursuit dans notre cas écrit comme suit :

$$e_x = x_1(t) - x_c \quad (2.9a)$$

$$e_y = x_3(t) - y_c \quad (2.9b)$$

On remplace les équations (4.62a) et (4.62b) dans l'équation (4.61) on trouve :

$$S(X) = \begin{pmatrix} x_2(t) + \lambda_1(x_1(t) - x_c) \\ x_4(t) + \lambda_2(x_3(t) - y_c) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Après définition de la surface de glissement, on utilise l'équation (2.6) pour déterminer la loi de commande du robot planaire à 4 câblés par mode glissant.

$$u_{MG} = \left(\frac{\partial S(X)}{\partial X} g(X) \right)^{-1} \left(-\frac{\partial S(X)}{\partial X} f(X) - K \text{sign}(S(X)) \right) \quad (2.11)$$

Tel que :

$$\frac{\partial S(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 & 1 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{M_{22}}{b} & \frac{-M_{12}}{b} \\ 0 & 0 \\ \frac{-M_{21}}{b} & \frac{M_{11}}{b} \end{bmatrix} \quad f(X) = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \frac{a_1 x_2(t) + a_2 x_4(t)}{b} \\ x_4(t) \\ \frac{a_3 x_2(t) + a_4 x_4(t)}{b} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ou :

$$a_1 = M_{12}N_{21} - M_{22}N_{11} ; a_2 = M_{12}N_{22} - M_{22}N_{12} ; a_3 = M_{21}N_{11} - M_{11}N_{21}$$

$$a_4 = M_{21}N_{12} - M_{11}N_{22} ; b = M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} \quad (2.14)$$

On remplace dans l'équation (2.6) on trouve :

$$u_{MG} = \begin{pmatrix} \frac{M_{22}}{b} & \frac{-M_{12}}{b} \\ \frac{-M_{21}}{b} & \frac{M_{11}}{b} \end{pmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} \left(\frac{a_1}{b} + \lambda_1\right) x_2(t) + \frac{a_2}{b} x_4(t) \\ \frac{a_3}{b} x_2(t) + \left(\frac{a_4}{b} + \lambda_2\right) x_4(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \text{sign}\left(\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix}\right) \right) \quad (2.15)$$

Les constantes $\lambda_1, \lambda_2, K_1$ et K_2 sont des constantes positives déterminées après la simulation de réponse et visualisation du comportement dynamique du robot.

2.3.2 Simulation de la commande par mode glissant

Donc après le calcul de la commande par mode glissant, on essaye de valider ces résultats par des simulations en utilisant MATLAB, de même qu'on assure des tensions des câbles positives il faut qu'on ajoute un bloc qui permette de calculer les couples optimaux des actionneurs (voir la section (3.5)), la figure (4.22) décrit le diagramme de commande du robot planaire à 4 câbles par mode glissant.

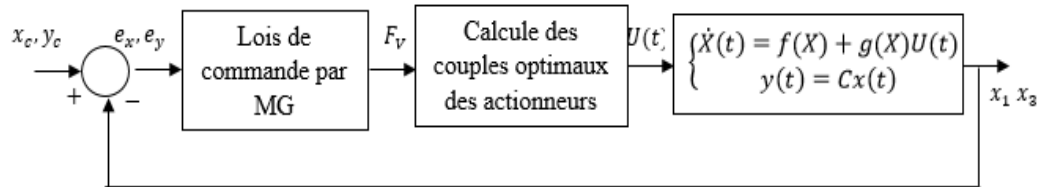


Figure 2.3 : diagramme de commande du robot par mode glissant.

Nous faisons des simulations par différentes valeurs des constantes $\lambda_1, \lambda_2, K_1$ et K_2 pour choisir qui donnent des performances acceptables au robot les figures (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8) et (2.9) donnent les résultats de la simulation du robot :

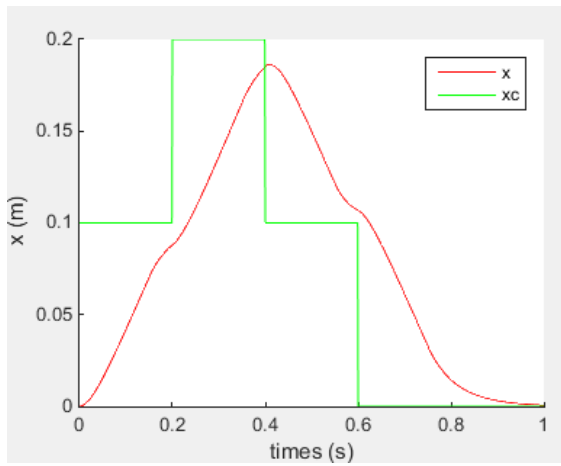


Figure 2.4 : profil de x (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 30, \lambda_2 = 30, K_1 = 20$ et $K_2 = 20$.

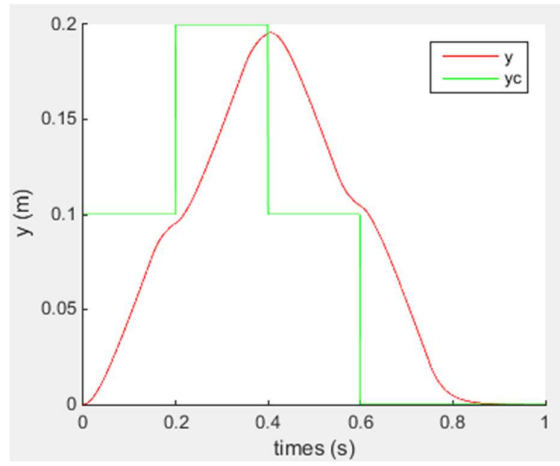


Figure 2.5 : profil de y (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 30, \lambda_2 = 30, K_1 = 20$ et $K_2 = 20$.

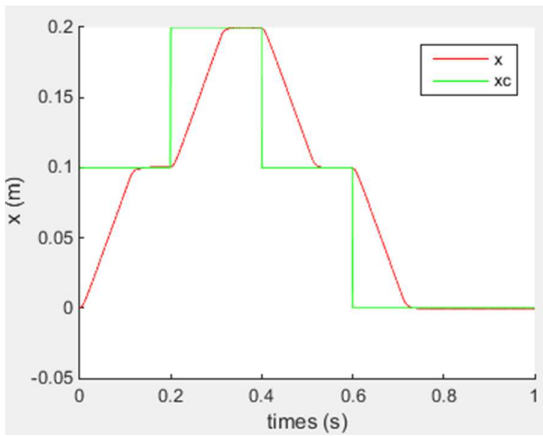


Figure 2.6 : profil de x (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 130, \lambda_2 = 130, K_1 = 120$ et $K_2 = 120$.

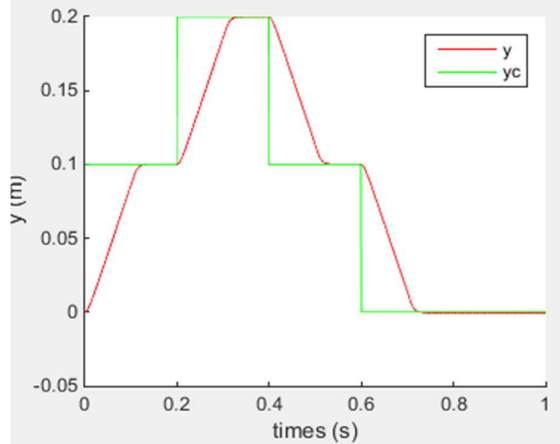


Figure 2.7 : profil de y (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 130, \lambda_2 = 130, K_1 = 120$ et $K_2 = 120$.

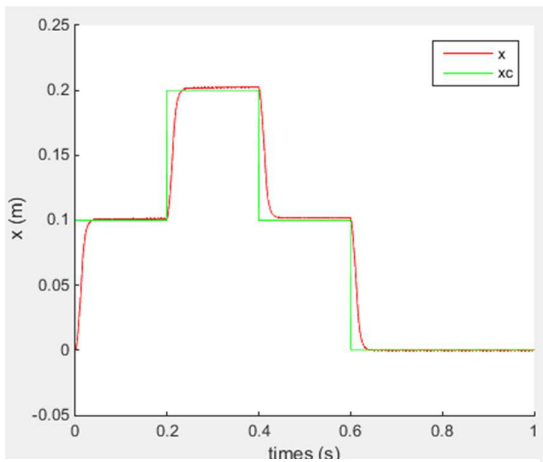


Figure 2.8 : profil de x (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 150, \lambda_2 = 150, K_1 = 1000$ et $K_2 = 1000$.

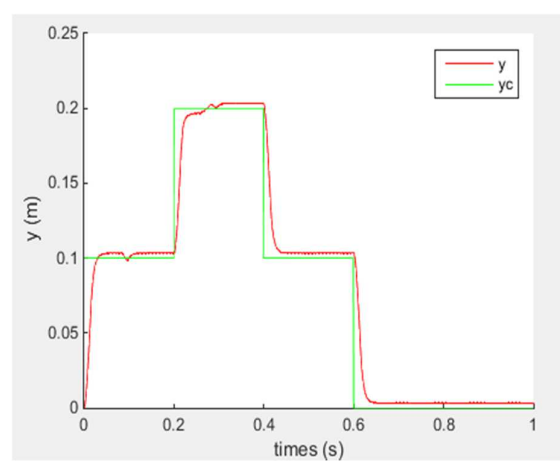


Figure 2.9 : profil de y (m) par mode glissant pour les constantes $\lambda_1 = 150, \lambda_2 = 150, K_1 = 1000$ et $K_2 = 1000$.

Commentaire :

1. On remarque que les sorties du robot sont stables et suivent des consignes, donc on assure les contraintes dynamiques et statiques en utilisant la commande par mode glissant.
2. Dans la simulation on essaie plusieurs valeurs de $\lambda_1, \lambda_2, K_1$ et K_2 pour améliorer le temps de réponse du robot pour tomber sur une plage des valeurs qui donne des temps des réponses acceptables pour la commande du robot, mais on remarque que on rencontre le problème de « Broutement ».

2.3.3 Le phénomène de broutement ou Chattering

Cette problématique est importante car elle reste actuellement l'obstacle principal à l'essor de la commande par mode glissant. L'action discontinue, du fait d'une fréquence de commutation (due aux retards de relais et des petites constantes de temps des actionneurs) ne génère pas un mode glissant idéal : des oscillations de haute fréquence apparaissent autour du point d'équilibre. Ce phénomène de broutement ou chattering peut nuire le fonctionnement du circuit de puissance [9] ; Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

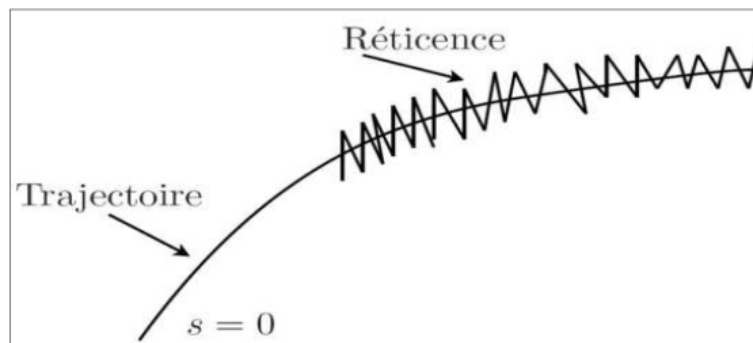


Figure 2.10 : phénomène de broutement.

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, fuzzysliding mode, mode glissant d'ordre supérieur, approachlaw, etc.....

Dans notre cas on utilisant la plus simple solution c'est la solution de la couche limite, Cette solution, connue aussi sous le nom de " boundary layer solution", consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface, Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation :

$$sat(S) = \begin{cases} \frac{S}{\varepsilon} & si \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| \leq 1 \\ sign(S) & si \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (2.16)$$

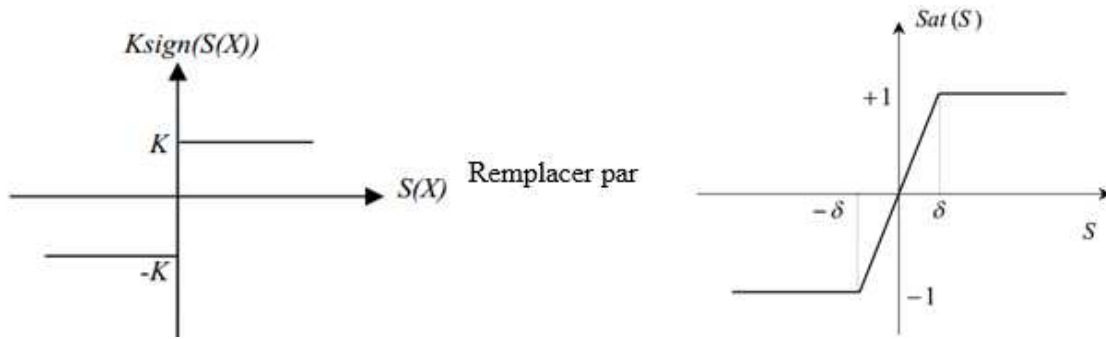


Figure 2.11 : représentation de la fonction "sign" et la fonction "sat".

Alors on peut dire qu'on remplace la fonction "sign" dans la loi de commande par la fonction "sat", la loi de commande devient :

$$u_{MG} = \begin{pmatrix} \frac{M_{22}}{b} & \frac{-M_{12}}{b} \\ \frac{-M_{21}}{b} & \frac{M_{11}}{b} \end{pmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} \left(\frac{a_1}{b} + \lambda_1\right) x_2(t) + \frac{a_2}{b} x_4(t) \\ \frac{a_3}{b} x_2(t) + \left(\frac{a_4}{b} + \lambda_2\right) x_4(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} sat\left(\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix}\right) \right) \quad (2.17)$$

Donc pour les valeurs des constantes $\lambda_1 = 150, \lambda_2 = 1500, K_1 = 1000$ et $K_2 = 1000$ on obtient les simulations suivantes :

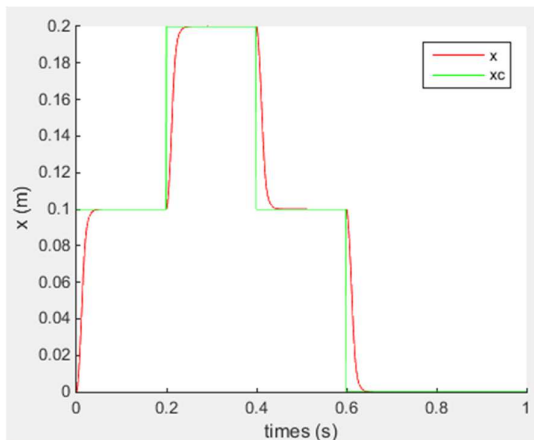


Figure 2.12 : profil de x (m) par mode glissant avec couche limite pour les constantes $\lambda_1 = 150, \lambda_2 = 150, K_1 = 1000$ et $K_2 = 1000$.

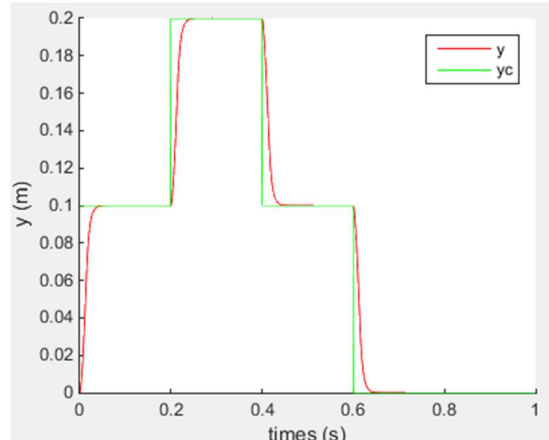


Figure 2.13 : profil de y (m) par mode glissant avec couche limite pour les constantes $\lambda_1 = 150, \lambda_2 = 150, K_1 = 1000$ et $K_2 = 1000$.

On remarque après les résultats de simulation (les figure (2.12) et (2.13)) que le phénomène de broutement disparue.

2.3.4 Simulation des trajectoires

Alors on peut simuler quelques trajectoires pour valider notre technique de commande par mode glissant, donc on les trois trajectoires suivantes :

1. **Cercle** : les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x_c = R \cos(\varphi) \\ y_c = R \sin(\varphi) \end{cases} \quad (2.18)$$

Tel que :

$$R = 0.2 \text{ m} \quad \varphi = D * r(t)t_f = 1s \quad D = 2\pi \quad (2.19)$$

Trajectoire de Lissajous : les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x_c = R \sin(2\varphi) \\ y_c = R \cos(\varphi) \end{cases} \quad (2.20)$$

Tel que :

$$R = 0.2 \text{ m} \quad \varphi = D * r(t)t_f = 1s \quad D = 2\pi \quad (2.21)$$

2. **Trajectoire spirale** : les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x_c = R \sin(\varphi) \\ y_c = R \cos(\varphi) \end{cases} \quad (2.22)$$

Tel que :

$$R = ae^{bt} \quad a = 0.05 \quad b = 0.1 \quad \varphi = D * r(t)t_f = 1s \quad (2.23)$$

Pour cette trajectoire on prend deux cas pour D :

$$D_1 = 2\pi \text{ Et } D_2 = 6\pi \quad (2.24)$$

Les résultats de la simulation donnée dans les figures (2.14), (2.15), (2.16) et (2.17) sont faits pour un seuil ($\varepsilon = 0.01$) :

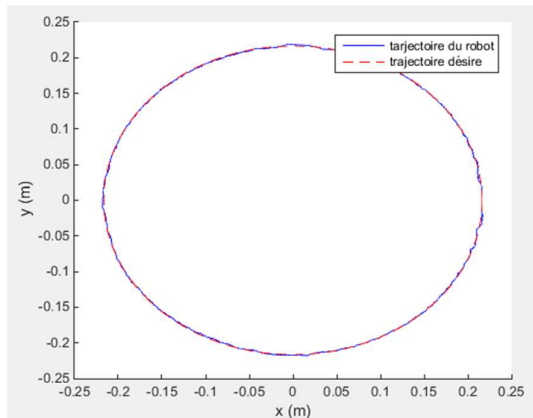


Figure 2.14 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire circulaire pour($\varepsilon = 0.01$) .

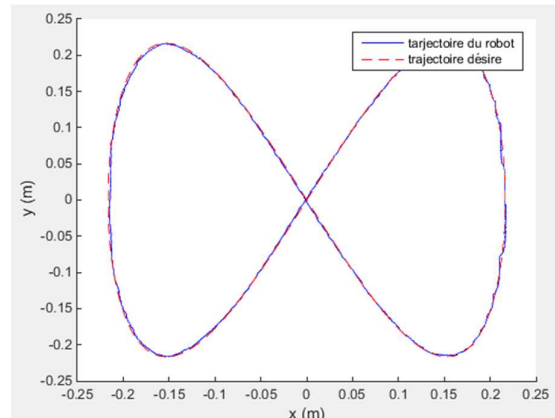


Figure 2.15 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire de Lissajous pour($\varepsilon = 0.01$) .

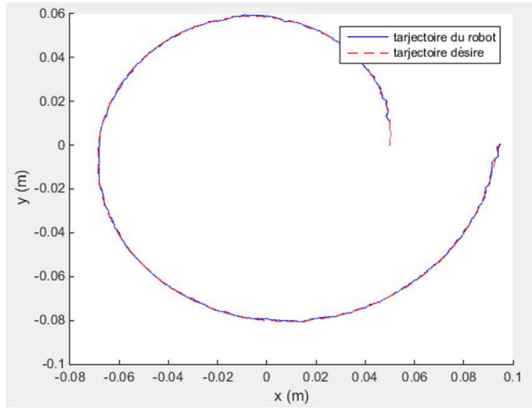


Figure 2.16 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire spirale avec trois période (2π) pour($\varepsilon = 0.01$).

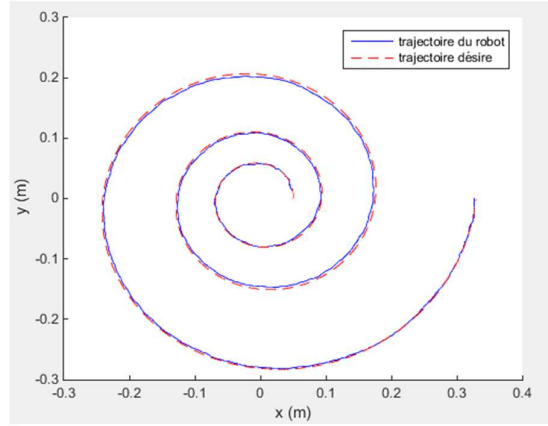


Figure 2.17 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire spirale avec une période (6π) pour($\varepsilon = 0.01$).

Commentaire :

D'après les simulations l'effecteur de robot planaire à 4 câbles suit les trajectoires désirées, mais le phénomène de broutement reste, ce problème est à cause de seuil (ε) de la fonction "sat" qu'est très petite, donc la fonction "sat" converge vers la fonction "sign", donc on peut dire que pour réduire ce phénomène on augmente le seuil(ε).

On peut dire que le broutement produit une dynamique importante sur les actionneurs, ce qui peut réduire leurs « temps de vie » et d'être la cause de vibrations dangereuses, aussi cette dynamique peut nuire le circuit de puissance.

On remarque aussi que l'optimisation des couples n'est pas 100% correcte à cause la dynamique produit par le broutement.

Les résultats de la simulation donnée dans les figures (2.18), (2.19), (2.20) et (2.21) sont faits pour un seuil ($\varepsilon = 1$) :

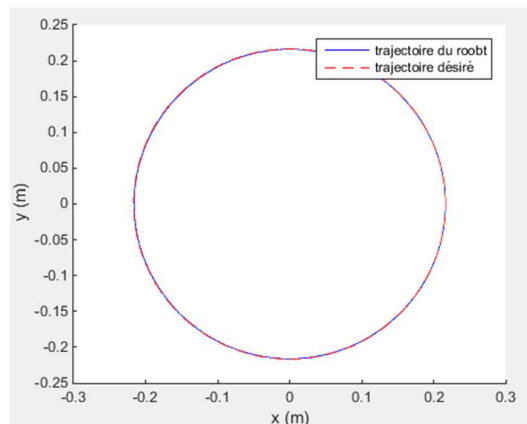


Figure 2.18 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire circulaire pour($\varepsilon = 1$) .

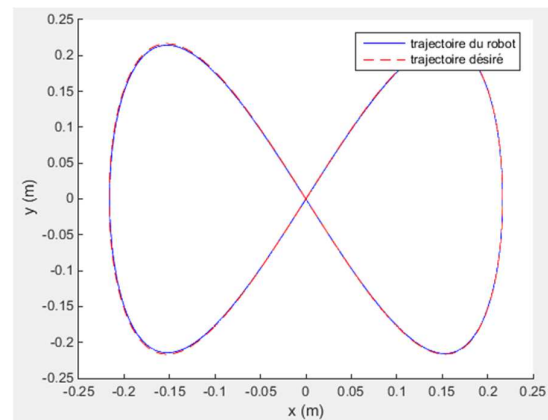


Figure 2.19 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire de Lissajous pour($\varepsilon = 1$).

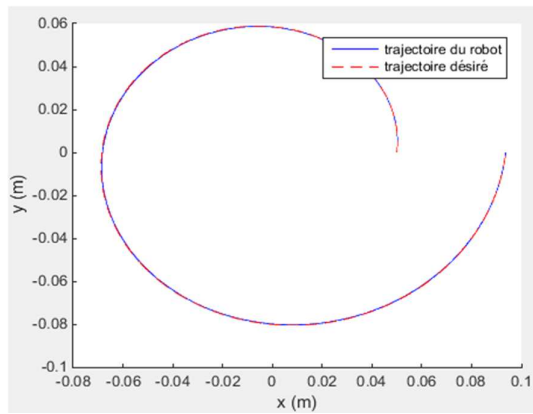


Figure 2.20 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire spirale avec une période (2π) pour ($\varepsilon = 1$).

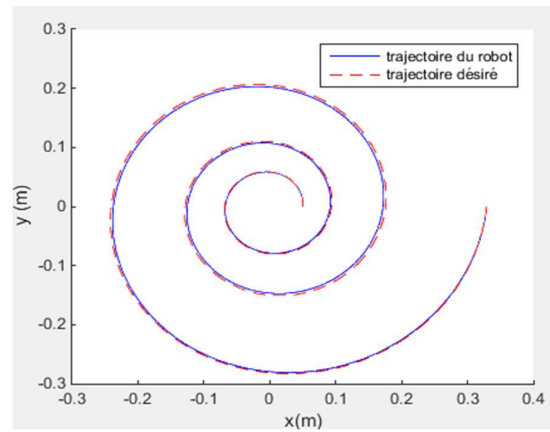


Figure 2.21 : réponse du robot par mode glissant pour une trajectoire spirale avec trois période (6π) pour ($\varepsilon = 1$).

D'après c'est résultat on conclure qu'on peut appliquer la commande par mode glissant sur ces types des robots a câbles.

2.4 Technique de commande par mode glissant d'ordre supérieur

2.4.1 Introduction à la commande par mode glissant d'ordre supérieur

Dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de réticence de la commande par mode glissant d'ordre 1, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite. Une nouvelle solution basée sur la théorie des modes glissants d'ordre supérieur conduit à des lois de commande relativement simples et permet de réduire le phénomène de réticence, tout en conservant les performances du système.

La théorie de la commande par modes glissants d'ordre supérieur [23] est une alternative au problème des modes glissants classiques.

Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le chattering.

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques ils permettent aussi d'améliorer la précision asymptotique.

2.4.2 Mode glissant d'ordre deux

Considérons un système non linéaire décrit par :

$$\dot{X}(t) = f(X) + g(X)u \quad (2.25)$$

L'objectif est d'établir un régime glissant d'ordre deux par rapport à s , en imposant aux trajectoires d'état du système à évoluer au bout d'un temps fini sur l'ensemble S_2 et à ne plus le quitter ensuite :

$$S_2 = \{X: S = \dot{S} = 0\} \quad (2.26)$$

Ceci est réalisé par une commande agissant sur la dérivée seconde de la variable de glissement qui, de manière générale, peut s'écrire sous la forme :

$$\ddot{S} = \varphi(X) + \phi(X)v \quad (2.27)$$

Avec

- $v = \dot{U}$ dans le cas où le système (2.25) est de degré relatif $n = 1$ par rapport à S , c.à.d. $\frac{\partial}{\partial U} \dot{S} = 0$.
- $v = U$ dans le cas où le système (2.25) est de degré relatif $n = 2$ par rapport à S , c.à.d. $\frac{\partial}{\partial U} \ddot{S} = 0$.

Afin de réaliser des algorithmes par modes glissants d'ordre deux, il est nécessaire de vérifier l'hypothèse de travail suivante pour valider l'atteignable de la surface de glissement et la bornitude de la variable \ddot{S} [23]:

- Les fonctions incertaines $\varphi(X)$ et $\phi(X)$ sont bornées.
- il existe quatre constantes positives S_0, C_0, K_m et K_M telles que, dans un voisinage $|S(X)| < S_0$ les inégalités suivantes soient vérifiées :

$$|\varphi(X)| < C_0 \quad \text{et} \quad 0 < K_m < \phi(X) < K_M$$

Les hypothèses énoncées ci-dessus impliquent que la dérivée seconde de la fonction de commutation est uniformément bornée dans un certain domaine pour l'entrée considérée.

2.4.3 Exemples de commandes par modes glissants d'ordre 2

Dans la littérature, plusieurs algorithmes modes glissants d'ordre 2 ont été introduits. Parmi ces algorithmes, on cite :

- Algorithme du Twisting.
- Algorithme du Super Twisting.
- Algorithme du prescribed convergence law (Algorithme avec une loi de convergence prédéfinie).

2.4.3.1 Algorithme du Twisting (TWG)

En plus de la commutation du signe de la commande, on commute son amplitude entre deux valeurs en fonction du quadrant dans lequel se trouve l'état du système. La trajectoire du système dans le plan de phase tourne autour de l'origine en s'en rapprochant à la manière d'une spirale.

Son expression pour un système de degré relatif 2 est :

$$u = -r_1 \text{sign}(S) - r_2 \text{sign}(\dot{S}) \quad \text{Avec } r_2 > r_1 > 0 \quad (2.28)$$

La trajectoire du système différentiel converge au point d'équilibre $S = \dot{S} = 0$ en un temps fini sous les conditions suivantes :

$$(r_1 + r_2)K_m - C_0 > (r_1 - r_2)K_M + C_0 \quad \text{et } (r_1 + r_2)K_m \gg C_0 \quad (2.29)$$

2.4.3.2 Algorithme du super-Twisting

Cet algorithme a été développé pour l'asservissement de systèmes à degré relatif égal à 1 par rapport à la surface de glissement. Cette loi de commande a été proposée par Emelyanov en 1990.

Le Super-Twisting n'utilise pas d'informations sur \dot{S} ceci peut être vu comme un avantage. Il est composé de deux parties, une partie discontinue u_2 et une partie continue u_1 .

$$u = u_1 + u_2 \quad (2.30)$$

$$\dot{u}_1 = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > U_M \\ -\alpha \text{sign}(S) & \text{si non} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$u_2 = \begin{cases} -\lambda |S_0|^\rho \text{sign}(S) & \text{si } |u| > S_0 \\ -\lambda |S|^\rho \text{sign}(S) & \text{si non} \end{cases} \quad (2.32)$$

Avec α, λ, ρ vérifiant les inégalités suivantes :

$$\alpha > \frac{C_0}{K_m} \quad 0 < \rho << 0.5 \quad \lambda^2 > \frac{4C_0 K_M (\alpha + C_0)}{K_m^2 K_m (\alpha - C_0)} \quad (2.33)$$

2.4.4 Exemples de commandes par Mode glissant d'ordre arbitraire

Les commandes par modes glissants d'ordre supérieur à 2 sont plus difficiles à concevoir. Beaucoup d'algorithmes d'ordre arbitraire connus ont une forme récursive.

2.4.4.1 Algorithme de Levant

La loi de commande repose sur l'utilisation de différentes surfaces de glissement, chacune faisant converger le système en temps fini vers la prochaine surface. Une fois la nouvelle surface atteinte, le système peut quitter la surface précédente. L'état du système transite d'une surface à l'autre alternativement jusqu'à atteindre l'origine, en temps fini.

La commande par l'algorithme de levant pour $n = 1, 2 \dots 4$ est choisie respectivement comme suit :

$$u = -\alpha \operatorname{sign}(S) \quad (2.34)$$

$$u = -\alpha \operatorname{sign}\left(\dot{S} + \beta |S|^{0.5} \operatorname{sign}(S)\right) \quad (2.35)$$

$$u = -\alpha \operatorname{sign}\left(\ddot{S} + 2\left(|\dot{S}|^3 + |S|^2\right)^{\frac{1}{6}} \operatorname{sign}\left(\dot{S} + |S|^{\frac{2}{3}} \operatorname{sign}(S)\right)\right) \quad (2.36)$$

$$u = -\alpha \operatorname{sign}\left(\ddot{S} + 3\left(\dot{S}^6 + \dot{S}^4 + |S|^3\right)^{\frac{1}{12}} \operatorname{sign}\left(\dot{S} + \left(\dot{S}^4 + |S|^3\right)^{\frac{1}{6}} \operatorname{sign}\left(\dot{S} + 0.5|S|^{\frac{3}{4}} \operatorname{sign}(S)\right)\right)\right) \quad (2.37)$$

2.4.4.2 Algorithme de la commande quasi-continue (QC)

La commande par modes glissants d'ordre supérieur quasi-continue a été récemment développée par [23] selon le principe de l'homogénéité. Ce type de commande appartient à la théorie des systèmes à structure variable et assure la convergence de l'état du système vers l'origine en temps fini.

La commande par quasi-continue pour $n = 1, 2 \dots 4$ est choisie comme suit :

$$u = -\alpha \operatorname{sign}(S) \quad (2.38)$$

$$u = -\alpha \frac{\dot{S} + |S|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(S)}{|\dot{S}| + |S|^{\frac{1}{2}}} \quad (2.39)$$

$$u = -\alpha \frac{\ddot{S} + 2\left(|\dot{S}| + |S|^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{-1}{2}} \left[|\dot{S}| + |S|^{\frac{2}{3}} \operatorname{sign}(S)\right]}{|\ddot{S}| + 2\left(|\dot{S}| + |S|^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.40)$$

$$u = -\alpha \frac{\ddot{s}+3 \left[\dot{s} + \left(|\dot{s}| + 0.5|\dot{s}|^{\frac{3}{4}} \right)^{\frac{-1}{3}} \left(\dot{s} + 0.5|\dot{s}|^{\frac{3}{4}} \operatorname{sign}(s) \right) \right] \left[|\dot{s}| + \left(|\dot{s}| + 0.5|\dot{s}|^{\frac{3}{4}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{-1}{2}}}{|\ddot{s}|+3 \left[|\dot{s}| + \left(|\dot{s}| + 0.5|\dot{s}|^{\frac{3}{4}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{-1}{2}}} \quad (2.41)$$

Le paramètre α est choisi spécifiquement pour toutes les valeurs fixes K_m, K_M et C_0 tel que :

$$\alpha K_m - C_0 > 0 \quad (2.42)$$

2.4.5 Suppression du phénomène de chattering

Malgré les propriétés prouvées du contrôleur en mode glissant d'ordre supérieur, le terme discontinu dans la loi de commande globale introduit le phénomène de broutement (chattering). Pour éliminer les effets indésirables de ce phénomène, plusieurs méthodes ont été proposées.

On propose d'appliquer l'idée de la méthode couche limite, utilisée pour réduire le chattering des algorithmes par mode glissant d'ordre un, en remplaçant la fonction signe par la fonction continue (*tanh* tangente hyperbolique) dans les lois de commande en mode glissant d'ordre supérieur.

2.5 La commande par mode glissant d'ordre supérieur du robot planaire a 4 câbles

2.5.1 Synthèse de la commande par mode glissant d'ordre deux

Dans cette partie et après l'étude théorique de la commande par mode glissant d'ordre supérieur on essaye de synthétiser une commande pour le robot planaire a 4 câbles qui régit par la représentation d'état vue dans la section (1.5) et on peut écrire le système sous la forme :

$$\dot{X}(t) = f(X) + g(X)U \quad (2.43)$$

Tel que :

$$g(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{M_{22}}{b} & \frac{-M_{12}}{b} \\ 0 & 0 \\ \frac{-M_{21}}{b} & \frac{M_{11}}{b} \end{bmatrix} \quad f(X) = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \frac{a_1 x_2(t) + a_2 x_4(t)}{b} \\ x_4(t) \\ \frac{a_3 x_2(t) + a_4 x_4(t)}{b} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Ou :

$$a_1 = M_{12}N_{21} - M_{22}N_{11} ; a_2 = M_{12}N_{22} - M_{22}N_{12} ; a_3 = M_{21}N_{11} - M_{11}N_{21}$$

$$a_4 = M_{21}N_{12} - M_{11}N_{22} ; b = M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} \quad (2.45)$$

Dans le but d'augmenter la précision, de diminuer le temps de convergence et de simplifier les calculs on utilise la théorie des modes glissants d'ordre 2 pour calculer la commande sans passer par le mode glissant d'ordre un. Pour cela il est nécessaire de définir une variable de glissement s tel que son degré relatif par rapport à la commande soit égal à 2.

On prend donc :

$$S_x = e_x = x_1(t) - x_c \quad (2.46a)$$

$$S_y = e_y = x_3(t) - y_c \quad (2.46b)$$

Parmi les lois de commande existant dans la littérature, on peut citer en particulier :

- Algorithme de Twisting :

$$u_1 = -r_{1x} \tanh(S_x) - r_{2x} \tanh(\dot{S}_x) \quad (2.47a)$$

$$u_2 = -r_{1y} \tanh(S_y) - r_{2y} \tanh(\dot{S}_y) \quad (2.47b)$$

Pour garantir la convergence en temps fini il faut que r_{1x}, r_{2x}, r_{1y} et r_{2y} vérifient les conditions suivantes :

$$(r_{1x} + r_{2x})K_{mx} - C_{0x} > (r_{1x} - r_{2x})K_{Mx} + C_{0x} \quad \text{Et} \quad (r_{1x} + r_{2x})K_{mx} > C_{0x} \quad (2.48a)$$

$$(r_{1y} + r_{2y})K_{my} - C_{0y} > (r_{1y} - r_{2y})K_{My} + C_{0y} \quad \text{Et} \quad (r_{1y} + r_{2y})K_{my} > C_{0y} \quad (2.48b)$$

- Algorithme de Levant

On prend $n = 2$ alors on a les lois de commande suivant :

$$u_1 = -\alpha_x \tanh(\dot{S}_x + \beta_x |S_x|^{0.5} \tanh(S_x)) \quad (2.49a)$$

$$u_2 = -\alpha_y \tanh(\dot{S}_y + \beta_y |S_y|^{0.5} \tanh(S_y)) \quad (2.49b)$$

La condition de convergence est :

$$\alpha_x K_{mx} - C_{0x} > \frac{\beta_x^2}{2} \quad (2.50a)$$

$$\alpha_y K_{my} - C_{0y} > \frac{\beta_y^2}{2} \quad (2.50b)$$

2.5.2 Simulation du la commande par mode glissant d'ordre supérieur

Donc après le calcul de la loi de commande par mode glissant d'ordre supérieur, on essaye de valider ces résultats par des simulations en utilisant MATLAB, de même qu'on assure des tensions des câbles positives il faut qu'on ajoute un bloc qui permette de calculer les couples optimaux des actionneurs (voir le projet de fin d'étude), la figure (4.22) décrit le diagramme de commande du robot planaire à 4 câbles par mode glissant.

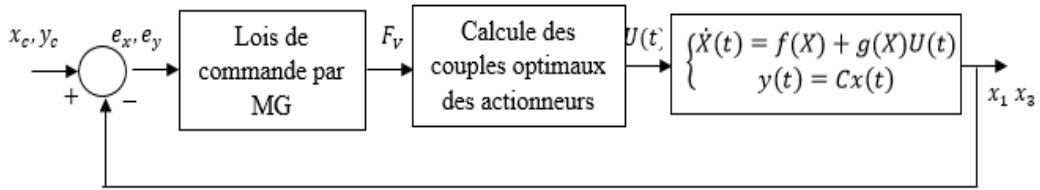


Figure 2.22 : diagramme de commande du robot par mode glissant.

Les figures (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.27) et (2.28) définissent la réponse du robot planaire à 4 câbles en utilisant les différents algorithmes de synthèses de commande par mode glissant d'ordre supérieur.

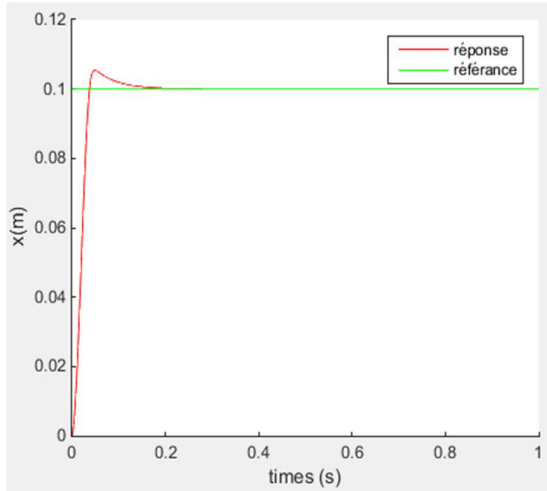


Figure 2.23 : le profil de x(m) on utilisant l'algorithme de Twisting.

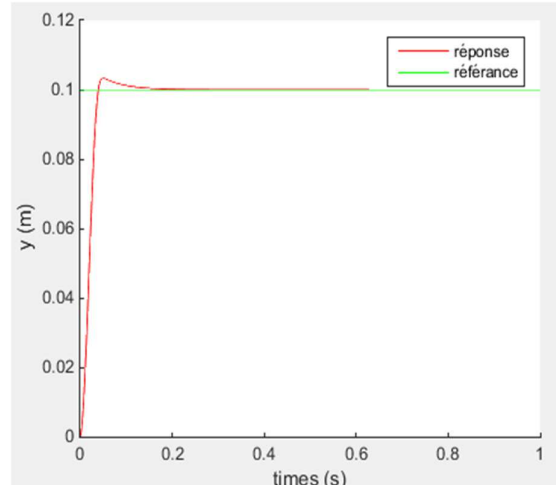


Figure 2.24 : le profil de y(m) on utilisant l'algorithme de Twisting.

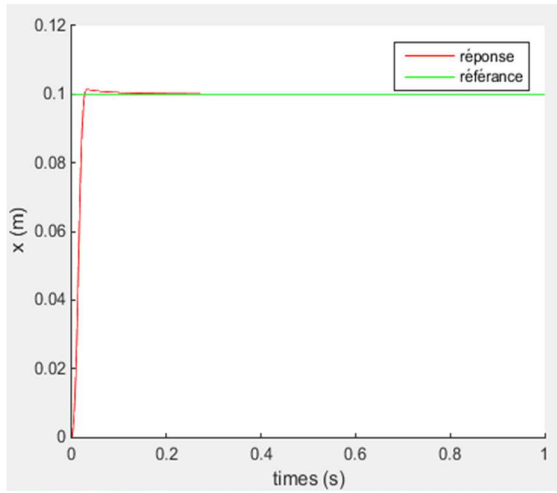


Figure 2.25 : le profil de x(m) on utilisant l'algorithme de Levant.

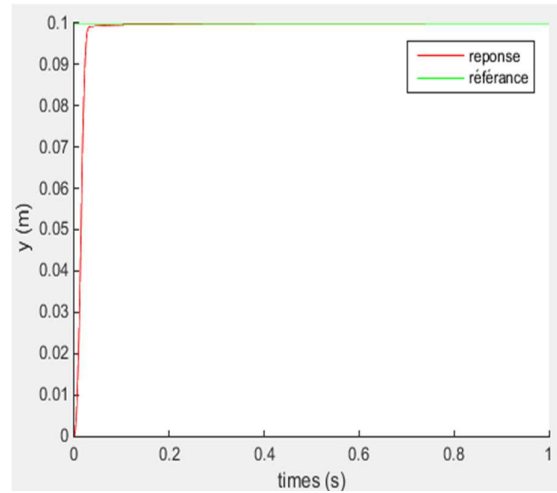


Figure 2.26 : le profil de y(m) on utilisant l'algorithme de Levant.

Commentaire :

D'après les résultats de simulation on remarque qu'on les deux algorithmes satisfait les contrainte statique et dynamique des systèmes (erreur statique nulle et un bon temps de réponse) et aussi on remarque que le phénomène de broutement est éliminé.

2.5.3 Simulation des trajectoires

Alors on peut simuler quelques trajectoires pour valider notre technique de commande par mode glissant, donc on les trois trajectoires suivantes :

3. Cercle : les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x_c = R \cos(\varphi) \\ y_c = R \sin(\varphi) \end{cases} \quad (2.51)$$

Tel que :

$$R = 0.2 \text{ m} \quad \varphi = D * r(t)t_f = 1s \quad D = 2\pi \quad (2.52)$$

4. Trajectoire spirale : les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x_c = R \sin(\varphi) \\ y_c = R \cos(\varphi) \end{cases} \quad (2.53)$$

Tel que :

$$R = ae^{bt} \quad a = 0.05 \quad b = 0.1 \quad \varphi = D * r(t)t_f = 1s \quad D = 6\pi \quad (2.54)$$

Alors on a les résultats suivant :

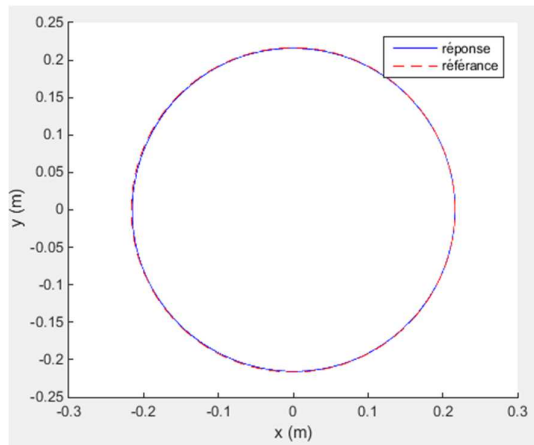


Figure 2.27 : réponse du robot a un cercle avec l’algorithme de Twisting.

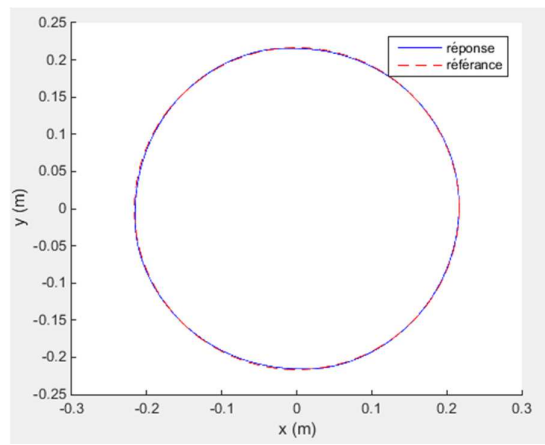


Figure 2.28 : réponse du robot a un cercle avec l’algorithme de Levant.

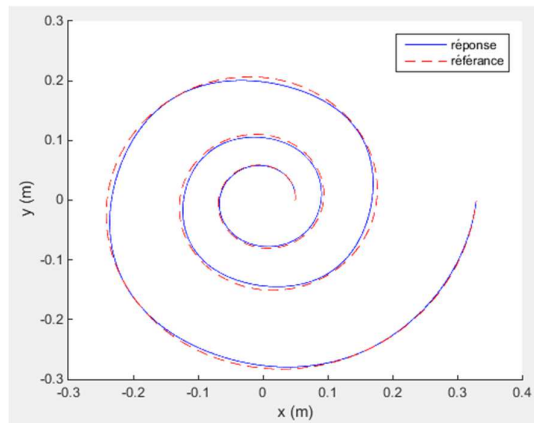


Figure 2.29 : réponse du robot a une spirale avec l’algorithme de Twisting.

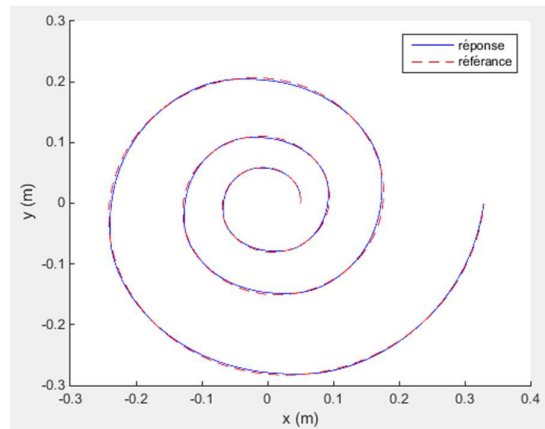


Figure 2.30 : réponse du robot a une spirale avec l’algorithme de Levant.

Commentaire :

On remarque que les deux algorithmes donné des très bons résultats pour le suivre d’une trajectoire, et on remarque aussi que le phénomène de broutement est éliminé ; alors on peut conclure qu’on peut appliquer la commande par mode glissant d’ordre supérieur sur le robot planaire a 4 câbles.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a commandé le robot planaire a 4 câbles avec deux techniques l’une est la commande par mode glissant d’ordre un et l’autre commande par mode glissant d’ordre supérieur. Alors on peut dire que la commande par mode glissant d’ordre supérieur permis d’amélioré les performances du robot planaire a 4 câbles et éliminé le phénomène du broutement (chattering).

Conclusion générale

Dans le cadre de continuation des travaux sur le robot planaire à 4 câbles au niveau de Laboratoire de Commande des Processus (LCP), l'objectif de ce travail est l'implémentation de la commande par mode glissant d'ordre un et d'ordre supérieur.

L'étude réalisée a permis de noter les conclusions suivantes :

- Pour étudier le comportement du robot on a développée des programmes sous MATLAB, cette simulation permet de donner les différentes réponses du robot (impulsionnelle, indicielle et sinusoïdale) à partir de ces réponses on peut dire que notre système est instable.
- la validation de la représentation d'état et de l'algorithme d'optimisation des couples avec des programmes sous MATLAB a abouti que le robot nécessite une commande en boucle fermée.
- La non linéarité du système nous a obligé d'utiliser des techniques de synthèse non linéaire, l'utilisation de la commande par mode glissant d'ordre supérieur pour le robot planaire à 4 câbles permis d'améliorer les performances et la robustesse du systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Robert L. Williams II and Paolo Gallina. "Planar Cable-Direct-Driven Robots, PartI: Kinematics and Statics". 2001 ASME Design Technical Conferences 27th Design Automation Conference September 9-12, 2001, Pittsburgh, PA.
- [2] Robert L. Williams II and Paolo Gallina. "Planar Cable-Direct-Driven Robots". Journal of Robotic Systems Vol. 37, pp. 69-96, 2003.
- [3] Robert L. Williams II and Paolo Gallina and Jigar Vadia. "Planar Cable-Direct-Driven Robots". Journal of Robotic Systems Vol. 20, No. 3, pp. 107-120, 2003.
- [4] Etienne Dombre ,Wisama Khalil. "Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators". Vol 413, 2007
- [5] Corinne Vachier ,REPRESENTATION D'ETAT ET COMMANDE DANS L'ESPACE D'ETAT,MAITRISE EEA - IUP GEII, Université Paris XII-Val de Marne , France.
- [6]Merabet Boulouiha, TECHNIQUES DE COMMANDE AVANCÉE, Centre universitaire de Rélizane Ahmed Zabana. Algérie
- [7] ABDERREZEK Hadjer, « Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires »,UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS -SETIF-1, Algérie, 2014.
- [8]Deghboudj Imen. "Commande des Systèmes Non Linéaires par Mode Glissant d'Ordre, Supérieur". Université de Constantine, Algérie, 2013.
- [9] ABDELLI Houaria, « Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation »,Université des Sciences et de la Technologie d'Oran -Mohamed Boudiaf, Algérie.
- [10]Wisama KHALIL, Etienne DOMBRE, Bases de la modélisation et des robots de la - manipulateurs de type série commande,2012.
- [11]Mohamed Tadjine. "Automatique Avancée". Cours de 3eme année Automatique, 2013, L'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie.
- [12] J.P. Merlet. Kinematics of the wire-driven parallel robot MARIONET using linear actuators. In IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Pasadena, 2008.