

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Automatique

Laboratoire de Commande des Processus



MÉMOIRE DE MASTER
EN AUTOMATIQUE

**Commande hybride itérative-modes
glissants flous :
Application au robot mobile non
holonome**

Etudié par :

BENKHELLAT Imene

Proposé et dirigé par :

Pr. M.TADJINE (ENP)

Dr A.REZOUG (CDTA)

Soutenu publiquement le 29 juin 2017 devant un jury composé de

| | | | |
|---------------------|-------------------|----------------|------|
| Président | Mr M. S. BOUCHRIT | Professeur | ENP |
| Encadreur | Mr M. TADJINE | Professeur | ENP |
| Co-Encadreur | Mr A. REZOUG | Docteur d'état | CDTA |
| Examineur | Mr M.CHAKIR | Docteur d'état | ENP |

ENP 2017

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Automatique

Laboratoire de Commande des Processus



MÉMOIRE DE MASTER
EN AUTOMATIQUE

**Commande hybride itérative-modes
glissants flous :
Application au robot mobile non
holonome**

Etudié par :

BENKHELLAT Imene

Proposé et dirigé par :

Pr. M.TADJINE (ENP)

Dr A.REZOUG (CDTA)

Soutenu publiquement le 29 juin 2017 devant un jury composé de

| | | | |
|---------------------|-------------------|----------------|------|
| Président | Mr M. S. BOUCHRIT | Professeur | ENP |
| Encadreur | Mr M. TADJINE | Professeur | ENP |
| Co-Encadreur | Mr A. REZOUG | Docteur d'état | CDTA |
| Examineur | Mr M.CHAKIR | Docteur d'état | ENP |

ENP 2017

ملخص

في هذا العمل، قمنا بتطوير طريقة التحكم الهجين انزلاق متكررة في المجال الزمني لرصد تتبع كفاف غير الخطية من طرف الروبوت المتحرك فئة احادي الدورة. أيضا، هذه المذكرة تشمل تحسين طريقة التحكم PD-MG عن طريق استبدال جزء متقطع من وضع انزلاق بما يعادل الدرجة العالية التي نحصل عليها بخوارزمية التواء عظمى في المقام الأول، ومن خلال استغلال سطح غير الخطية للانزلاق في المكان الثاني. وأخيرا، تدرس صياغة الجزء الثاني في مجال الموضع. التحكم عن طريق وضع انزلاق أعلى يلغي تأثير الاصطكاك بشكل ملحوظ على إشارة التحكم مع الحفاظ على ترتيب طريقة أداء ومتانة الانزلاق.

كلمات مفتاحية: الأوامر عن طريق تحريك الوضع طمس، الاصطكاك ، التحكم عن طريق التعليم المتكرر، انزلاق مراقبة الوضع عن طريق زيادة مجال موقعة النظام وكفاف خطأ التتبع:

Abstract

The work presented in this thesis concerns the development of a hybrid iterative - fuzzy sliding mode control in the time domain for the tracking of a non-linear contour by a non-holonomic mobile robot of uni-cycle type. Also, this paper proposes the improvement of the conventional PD-SM control by replacing the discontinuous part of the sliding mode by its higher order equivalent obtained by the super twisting algorithm in the first place then by exploiting a non-linear sliding surface secondly. Finally, the formulation of the second part in the position domain is studied. The high order sliding mode control remarkably eliminates the effect of chattering on the control signal while maintaining the performance of the first order sliding mode and its robustness.

Keywords: chattering, sliding mode control, position domain, contour-tracking error, robustness.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le développement d'une commande hybride itérative-modes glissants flous dans le domaine temporel pour le suivi d'un contour non linéaire par un robot mobile non holonome de type uni-cycle. Aussi, ce mémoire propose l'amélioration de la commande PD-MG classique en remplaçant la partie discontinue du mode glissant par son équivalent d'ordre supérieur obtenu par l'algorithme du super twisting en premier lieu puis en exploitant une surface de glissement non linéaire en deuxième lieu. Enfin, la formulation de la deuxième partie dans le domaine de position est étudiée. La commande par mode glissant supérieur élimine remarquablement l'effet du broutement sur le signal commande tout en conservant les performances du mode glissant d'ordre un ainsi que sa robustesse.

Mots-clés : commandes par mode glissant flou, broutement, commande par apprentissage itératif, commande par mode glissant d'ordre supérieur, domaine de position, erreur de suivi de contour.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, le tout puissant de m'avoir accordée le savoir, le droit chemin, l'opportunité de poursuivre mes études et la force pour réaliser ce travail.

Le présent travail a été effectué sous la direction de Messieurs M. Tadjine et A.Rezzoug que je remercie vivement pour leur encadrement, leurs directives, leurs conseils précieux et surtout la confiance qu'ils m'ont accordée.

Je tiens également à remercier Messieurs M.Chakir et M.S.Boucherit, membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer mon travail.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont à tous mes enseignants du département du génie automatique en particulier et du génie électrique en général de l'Ecole Nationale Polytechnique pour les connaissances et le savoir faire qu'ils m'ont transmise pendant les cinq années de notre formation.

Je tiens à remercier de manière particulière mes chers parents, frères et sœurs respectives "que Dieu les protège" qui ont toujours été là pour nous et qui nous ont soutenus pendant toutes ces années d'études. J'espère qu'ils trouvent dans ce mémoire toute ma reconnaissance et tout mon amour.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DE MATIÈRES

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et Symboles

Abréviations

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 10 |
| 1 Généralités | 13 |
| 1.1 Commande PD-MG d'ordre supérieur | 14 |
| 1.1.1 Algorithme de super-twisting | 15 |
| 1.2 Commande PD-MGT | 15 |
| 1.3 Commande par logique floue | 15 |
| 1.4 Commande dans le domaine de position | 17 |
| 1.4.1 Dérivation relative et transformation du domaine temporel vers le do- maine de position | 18 |
| 1.4.2 Modèle dynamique temporel d'un robot à n ddl | 18 |
| 1.4.3 Modèle dynamique dans le domaine de position | 19 |
| 2 Synthèse des lois des commandes | 21 |
| 2.1 La commande PD-MG d'ordre supérieur (Algorithme du supertwisting) | 22 |
| 2.1.1 Commande dans le domaine temporel PD-MG d'ordre deux | 22 |
| 2.1.2 Commande dans le domaine de position PDP-MG d'ordre deux | 23 |
| 2.2 La commande PD-MGT | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.1 | Commande dans le domaine temporel PD-MGT | 23 |
| 2.2.2 | Commande dans le domaine de position PDP-MGT | 24 |
| 2.3 | Synthèse de la commande CAI-MGF | 24 |
| 3 | Simulation et Résultats | 27 |
| 3.1 | Configuration de la simulation | 28 |
| 3.2 | Résultats des simulations | 28 |
| 3.2.1 | Les commandes PD-MG et PDP-MG | 28 |
| 3.2.2 | La commande PD-MG d'ordre supérieur (Algorithme du supertwisting) | 30 |
| 3.2.3 | La commande PD-MGT) | 32 |
| 3.2.4 | Commande par CAI-MGF | 35 |
| 3.2.5 | Résultat de la simulation | 35 |
| | Conclusion générale | 38 |
| | Bibliographie | 41 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Règles d'inférence | 25 |
| 2.2 | Fonctions d'appartenance des entrées | 25 |
| 2.3 | Fonctions d'appartenance de la sortie | 26 |
| 3.1 | Robot mobile uni-cycle [1] | 28 |
| 3.2 | Erreurs de suivi du contour (contour arc) pour les méthodes PD-MG/PDP-MG | 29 |
| 3.3 | Signaux de commande pour les méthodes PD-MG/PDP-MG | 29 |
| 3.4 | Résultat de suivi du contour (contour arc) | 31 |
| 3.5 | Commandes dans le domaine temporel/position | 31 |
| 3.6 | erreurs de suivi de contour temporel/position | 32 |
| 3.7 | Résultat de suivi du contour (contour arc) | 33 |
| 3.8 | Commandes dans le domaine temporel/position | 34 |
| 3.9 | erreurs de suivi de contour temporel/position | 34 |
| 3.10 | Résultat de suivi du contour (contour arc) pour k=59 | 35 |
| 3.11 | Commandes par CAI-MGF pour k=59 | 36 |
| 3.12 | L'erreur de suivi de Contour (CAI-MGF) | 36 |
| 3.13 | Evolution de $\sup Ec $ au cours des itérations k=59 | 37 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Paramètres du Robot Mobile | 28 |
| 3.2 | Paramètres du régulateur PD-MG d'ordre deux | 30 |
| 3.3 | Paramètres du régulateur PD-MGT d'ordre deux | 33 |

Notations et Symboles

| Paramètres | Définition |
|--------------------|--|
| $C(q, \dot{q})$ | Matrice de contrainte. |
| $F(t, q, \dot{q})$ | Vecteur de forces des frottements. |
| $G(q)$ | Vecteur des forces gravitationnelles. |
| K_d | Gain dérivé. |
| K_p | Gain proportionnel. |
| e | Erreur de suivi de contour. |
| \dot{e} | Vitesse de l'erreur de suivi de contour. |
| sat | a fonction saturation . |
| $sign$ | La fonction signe . |

Abréviations

| Abréviation | Définition |
|----------------------|---|
| <i>PD – MG</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants classique. |
| <i>PDP – MG</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants classique dans le domaine de position. |
| <i>PD – MGT</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants Terminal (PD-Terminal Sliding Mode) |
| <i>PDP – MGT</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants Terminal dans le domaine de position. |
| <i>PD – MG – ST</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants Super Twisting |
| <i>PDP – MG – ST</i> | Proportionnel Dérivé- Modes Glissants Super Twisting dans le domaine de position. |
| <i>CAI – MGF</i> | Commande par Apprentissage Itératif- Modes Glissants-Flous. |
| <i>ddl</i> | Degrés de liberté. |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de techniques de commande avancées en l'occurrence le terminal sliding mode control et la commande par mode glissant d'ordre supérieur à un robot mobile. Ces techniques sont synthétisées dans le domaine temporel puis formulées dans le domaine de position afin de comparer leurs performances. Enfin, la méthode de commande dite par apprentissage itératif à mode glissant flou (Fuzzy Logic Sliding Mode Iterative Learning Control FSMILC) afin d'améliorer les résultats obtenus pour le réglage CAI-MG.

Le contrôle MG, l'une des découvertes les plus importantes dans la théorie de contrôle moderne, est un outil efficace pour résoudre les problèmes de contrôle des systèmes non linéaires. Il est bien connu que la commande MG est insensible aux incertitudes du modèle, aux variations de paramètres et aux perturbations externes. Ainsi, elle a été largement mise en œuvre dans de nombreux domaines tels que pour les systèmes multi-corps contraints, les suspensions actives et les systèmes de production photovoltaïque autonomes. En dépit des propriétés de robustesse assurée par la commande par mode glissant classique, les oscillations à haute fréquence des trajectoires d'état autour de la surface de glissement connu sous le nom de phénomène de broutement[5] sont les principaux obstacles à la mise en œuvre de la commande MG dans plusieurs applications. Plusieurs méthodes de réduction de broutement ont été proposées. Une approche place une couche limite autour de la surface de commutation de sorte que la commande de l'actionneur (relai) est remplacée par une fonction de saturation. Une autre méthode appelée méthode d'ordre supérieur a été développée pour les robots industriels.

Aussi, les actionneurs à glissement linéaire garantissent la stabilité asymptotique du système en mode glissant, mais les états du système convergent vers le point d'équilibre en un temps infini[4]. Afin d'assurer une convergence en temps fini, un mode de glissement non linéaire appelé mode de glissement de terminal (MGT) a été proposé qui offre une convergence plus rapide que le mode glissant à base de surface linéaire. Le MGT est adopté pour exploiter la convergence rapide du mode de glissement non linéaire s'il est correctement conçu.

Le présent travail sera organisé comme suit :

Le premier chapitre donnera des généralités sur la théorie des commandes étudiées dans la suite du mémoire.

Le deuxième chapitre portera sur la synthèse des lois de commande pour un robot mobile uni-cycle non holonome dont la description et le modèle dynamique sont donnés dans[1]. Le

troisième et dernier chapitre exposera les résultats des simulations obtenus ainsi que leurs interprétations.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

Chapitre 1 Généralités

Introduction

Dans ce chapitre, nous faisons le tour d'horizon sur des techniques de commandes non linéaires avancées. Ces commandes ont prouvé leur efficacité et leur robustesse face aux erreurs de modélisation du système à commander.

1.1 Commande PD-MG d'ordre supérieur

L'idée du mode de glissement classique (d'ordre un) est de choisir une surface de glissement dans l'espace d'état vérifiant $S(x)=0$ et sur laquelle l'objectif du commande est atteint. La partie discontinue de la commande $\delta u = K_s \text{sign}(S)$ cause une problème lors de l'implémentation. Aussi, la commutation de cette commande à une fréquence infinie jusqu'à assurer l'objectif de la commande s'avère impossible à réaliser pour un actionneur physique. En réalité, l'actionneur commute à une fréquence finie élevée généralement et pour un temps important, c'est l'origine du phénomène de chattering qui crée une commande de qualité indésirable qui risque de détériorer les performance du système .

Plusieurs solutions ont été apportées pour diminuer l'effet du broutement, une solution était de changer la fonction $\text{sign}(S)$, plusieurs fonctions ont été proposées , celle souvent utilisée est la fonction saturation définie comme suit :

$$\text{sat}(S, \phi) = \begin{cases} \text{sign}(S), & \text{si } \|S\| \geq \phi \\ \frac{S}{\phi}, & \text{si } \|S\| < \phi \\ \text{leqslant } \phi \end{cases} \quad (1.1)$$

Cependant cette solution peut causer une détérioration importante des performances et de la robustesse du système. Afin d'éliminer le broutement et de préserver la robustesse et les performances, la commande par mode glissant d'ordre supérieur est proposée dans le milieu des années 80, par Emylyanov et al comme une solution alternative. Dans cette nouvelle approche, la commande discontinue est décalée pour qu'elle agisse sur les dérivées d'ordres supérieurs de la surface de glissement et pas sur sa première dérivée.

Parmi les versions les plus connues on trouve le MG d'ordre deux où la commande discontinue agit sur la deuxième dérivée de la surface de glissement. L'algorithme du twisting et du super twisting sont les variantes les plus utilisées pour résoudre le problème de broutement d'un système de degré relatif égal à un par rapport à la surface de glissement.

1.1.1 Algorithme de super-twisting

Cet algorithme a été développé pour commander les systèmes de degré relatif égal à un ($r = 1$) afin d'annuler le phénomène de broutement qui est considéré comme un obstacle réel pour la réalisation de la commande par mode de glissement d'ordre un.

Son avantage est qu'il ne nécessite pas le calcul de la dérivée de la surface de glissement tout en gardant les propriétés du mode glissant. L'algorithme de commande est donné par la loi de commande suivante :

$$\begin{aligned}
 u(t) &= K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + u_{ST} \\
 u_{ST}(t) &= u_1(t) + u_2(t) \\
 \text{Avec} \\
 \dot{u}_1(t) &= \begin{cases} -u, & \text{si } \|u\| > u_M \\ -\beta \text{sign}(S), & \text{si } \|u\| < u_M \end{cases} \\
 u_2(t) &= \begin{cases} -\alpha S_0^q \text{sign}(S), & \text{si } \|S\| > S_0 \\ -\alpha \|S\|^q \text{sign}(S), & \text{si } \|S\| < S_0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

1.2 Commande PD-MGT

Le MGT a été proposé pour garantir une convergence rapide en temps fini pour les systèmes robotisés commandés. Son application a permis d'assurer une convergence en temps fini pour un gain de surface de glissement non linéaire très petit par rapport aux gains de la surface linéaire usuelle. Le problème de commande consiste à forcer le robot à poursuivre un contour désiré. Pour ce faire on définit la loi de commande à base de surface de glissement non linéaire suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + K_s \text{sign}(S) S(t) = e(t) + K \dot{e}^{\frac{p}{q}}(t) \tag{1.3}$$

Avec p et q sont deux entiers impairs vérifiant : $1 < \frac{p}{q} < 2$

1.3 Commande par logique floue

La logique floue, introduite par Zadeh en 1965, permet de représenter les incertitudes caractérisant le système et peut être vue comme une extension de la logique booléenne. L'un de ses atouts est qu'elle prend en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage humain naturel.

Le contrôleur flou de base

Les contrôleurs flous utilisent généralement l'expertise des opérateurs humains exprimée sous forme de règles linguistiques de type :

Si "x est Ai et y est Bi" Alors "u est Ci"

Pour des systèmes monovariabiles simples, l'erreur $e = x_d - x$ et la dérivée de l'erreur \dot{e} sont les variables d'observation floues utilisées. L'action de commande floue peut se traduire par une commande à appliquer directement au processus.

Description des différentes étapes du raisonnement

• La fuzzyfication

L'opération de fuzzyfication permet de définir le degré d'appartenance d'une variable observée, ou mesurée, à un ensemble flou donné. Cette opération représente le passage des grandeurs réelles (ou physique) aux valeurs floues.

• Le traitement de la prémisse

Dans la plupart des cas, la prémisse des règles utilise plusieurs observations floues liées pas les opérateurs ET et OU.

• Implication, inférence et agrégation des règles

L'**implication** permet d'évaluer le degré de validité d'une règle, en d'autres termes, on LA qualifie DE force de véracité entre la prémisse et la conclusion. Parmi toutes les normes d'implication qui existent [3], celles qui sont les plus utilisées sont : la norme Mamdani et la norme Larsen.

L'**inférence** floue est une opération basée sur les modes généralisés[3] qui permet d'évaluer la contribution d'une règle activée à la commande. En d'autres termes il s'agit de déterminer l'ensemble flou inféré résultant d'une règle de type Sugeno.

L'**agrégation** des règles utilise la contribution de toutes les règles activées pour en déduire une action de commande floue. Généralement, les règles sont activées en parallèle et sont liées par l'opération OU.

• Calcul de la commande réelle-défuzzyfication

L'opération de défuzzyfication permet de calculer, à partir de l'ensemble flou de la variation de la commande, la valeur réelle de cette variation de commande à appliquer au processus. Parmi les techniques de défuzzyfication les plus utilisées, on cite celle dite à base de centre de gravité. Cette méthode consiste à calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante. L'abscisse u de ce centre de gravité donne la valeur de commande à appliquer au processus, elle peut être déterminée par la relation générale suivante :

$$u = \frac{\int x_R \mu_{res}(x_R) dx_R}{\int \mu_{res}(x_R) dx_R} \quad (1.4)$$

Contrôleurs flous usuels

Les contrôleurs flous sont principalement de deux types :

1. Contrôleur flou type de Mamdani
2. Contrôleurs flou type de Sugeno.

L'originalité de la méthode de Sugeno réside dans le fait que la conclusion de chaque règle n'appartient pas au domaine symbolique, mais est définie sous forme numérique comme une combinaison linéaire des entrées. Une règle floue, selon la méthode de Sugeno s'exprime de la façon suivante :

Si "e est positive grande" et " é est nulle" Alors "u = p₀ + p₁x + p₂y".

On parle dans ce cas de contrôleur flou de type Sugeno d'ordre 1.

Dans le cas où les règles floues sont de la forme :

Si "e est positive grande" et " é est nulle" Alors "u = p₀".

On parle de contrôleur flou de type Sugeno d'ordre 0. Dans le contrôleur flou de type Sugeno, les étapes d'agrégations et de défuzzification des règles floues se font simultanément, et la relation (1.4) devient :

$$u = \frac{\sum \mu_i u_i}{\mu} \quad (1.5)$$

Cette méthode est plus simple à mettre en œuvre et donne d'aussi bons résultats en commande floue que la méthode de Mamdani. Le calcul en temps réel de cette expression ne pose pas de problème.

1.4 Commande dans le domaine de position

Dans une synthèse de commande dans le domaine des positions, un système à plusieurs agents est subdivisé entre des agents maître et esclaves. Le mouvement dynamique de l'agent maître est échantillonné de façon équidistante et utilisé en tant que référence indépendante, de la même manière que le temps est utilisé dans le contrôle dans le domaine temporel. Les mouvements des agents esclaves sont définis comme des fonctions du mouvement principal et les exigences de contour de désiré.

La formulation de ces fonctions nécessite le développement du modèle dynamique du système dans le domaine des positions grâce à une transformation du domaine temporel vers le domaine de position ainsi que de sa représentation en tant que système maître-esclave. L'avantage majeur de la commande dans le domaine de position est notamment l'élimination de l'erreur de suivi de la trajectoire de référence pour l'élément maître, ce qui minimise la contribution de la dynamique de l'agent maître à l'erreur de contour du système global. Ceci

s'explique par le fait que l'actualisation des calculs du correcteur développé dans le domaine de position est synchronisée avec l'échantillonnage des données relatives au mouvement de la variable maître. Par conséquent, afin de pouvoir commander le modèle esclave dans le domaine de position d'une manière efficace, la réponse temporelle du maître doit être mesurée avec une précision aussi élevée que possible.

1.4.1 Dérivation relative et transformation du domaine temporel vers le domaine de position

L'objectif d'une commande dans le domaine de position est de remplacer la dépendance temporelle du système par une dépendance à l'une de ses variables appelé variable de référence ou axe maître et notée "q_m" avec q_m = q₁. Les mouvements des autres variables, appelées esclaves, peuvent être représentés en fonction du mouvement de l'axe maître comme suit : q_i = q_i(q_m), i = 2, 3, ..., n.

La première étape pour transformer un système dynamique en son équivalent dans le domaine de position est de développer une relation qui relie le domaine de position au domaine temporel. Cela se fait en présentant la dynamique dérivée du mouvement de l'i ème esclave par rapport au mouvement de l'agent maître :

$$\dot{q}_i = \frac{dq_i}{dq_m} = \dot{q}_m \frac{dq_i}{dq_m} \quad (1.6)$$

De l'équation (1.6) on comprend aisément que \dot{q}' est le rapport de vitesse entre l'esclave et les vitesses de l'agent principal q_m qui décrit une relation de synchronisation entre les deux mouvements. Cette dérivée relative est appelée vitesse de position relative de l'agent par rapport à l'agent principal.

De la même manière, l'accélération de la position relative peut être définie comme la seconde dérivée relative :

$$\ddot{q}_i'' = \frac{d\dot{q}_i'}{dq_m} \quad (1.7)$$

De l'équation (1.6), la vitesse de l'axe i peut être définie comme suit :

$$\dot{q}_i = \dot{q}_m \dot{q}_i' \quad (1.8)$$

Par conséquent, l'équation (1.7) peut être exprimée comme :

$$\ddot{q}_i = \ddot{q}_m \dot{q}_i'^2 + \dot{q}_m \ddot{q}_i' \quad (1.9)$$

1.4.2 Modèle dynamique temporel d'un robot à n ddl

Le modèle d'un robot à n ddl peut être représenté comme suit :

$$M(q)\ddot{q}(t) + C(q, \dot{q})\dot{q}(t) + G(q) + F(t, q, \dot{q}) = B(q) \times \tau(t) \quad (1.10)$$

Où : $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ et $G(q)$ sont la matrice d'inertie, les forces centrifuges et de Coriolis et le vecteur de gravitation respectivement et $B(q)$ est la matrice de transformation de l'entrée . Enfin, $F(t, q, \dot{q})$ est la matrice comportant les forces de frottement et τ le vecteur de couples de commande.

On opte pour une représentation en structure maitre-esclave de la dynamique du robot comme décrit précédemment :

$$\begin{bmatrix} m_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{mm} & C_{ms} \\ C_{sm} & C_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_m \\ G_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_m \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_m \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

L'indice m se réfère à l'agent maitre et l'indice s se réfère aux agents esclaves.

1.4.3 Modèle dynamique dans le domaine de position

Dans le domaine de position, la position du maitre est utilisée comme référence indépendante pour le suivi d'un contour défini. Par conséquent, le modèle dynamique pour les agents esclaves peut être réécrit dans le domaine de position en fonction de la référence par une transformation du domaine temporel vers le domaine de position[8].

Un modèle dynamique pour les mouvements des esclaves dans le domaine de position est dérivé de la manière suivante :(Ouyang, Pano, and Dam, 2015) :

$$\dot{q}_m^2 M_{ss} q_s''(q_m) + (\ddot{q}_m M_{ss} + \dot{q}_m C_{ss}) q_s'(q_m) + \ddot{q}_m M_{sm} + \dot{q}_m C_{sm} + G_s + F_s = \tau_s(q_m) \quad (1.12)$$

L'équation ci-dessus représente la relation dynamique entre le mouvement principal, indiqué par l'indice m , et les mouvements des esclaves, indiqués par l'indice s

les dimensions du modèle dynamique dans le domaine de position sont $\{M_{sm}, G_s, F_s, \tau_s\} \in \mathfrak{R}^{n-1}$, $\{M_s, C_{ss}\} \in \mathfrak{R}^{(n-1) \times (n-1)}$ et $\{q_s, q_s', q_s''\} \in \mathfrak{R}^{n-1}$

La dynamique de l'esclave dans le domaine de position peut être redéfinie en utilisant les paramètres suivant :

$$\begin{cases} \overline{M} = \dot{q}_m^2 M_{ss} \\ \overline{C} = \ddot{q}_m M_{ss} + \dot{q}_m C_{ss} \\ \overline{D} = M_{sm} \ddot{q}_m + \dot{q}_m C_{sm} + G_s + F_s \end{cases} \quad (1.13)$$

L'équation(1.13) peut être exprimée sous la forme compacte suivante :

$$\overline{M} q_s''(q_m) + \overline{C} q_s'(q_m) + \overline{D} = \tau_s(q_m) \quad (1.14)$$

A l'évidence, la non-linéarité du modèle du domaine temporel dans l'équation (1.10) est maintenue dans le domaine de la position.

À partir de cette équation, on peut déduire que la position du maître a une plus grande

influence sur le contrôle du système que son erreur de suivi du contour désiré.

Il est clair que la structure de contrôle du domaine de position requiert que le contrôle du mouvement maître fonctionne dans le domaine temporel. Dans ce sens, la commande dans le domaine de position est la combinaison de deux contrôleurs de natures différentes s'exécutant en séquence.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit brièvement le concept des techniques de commandes adoptées dans notre travail.

CHAPITRE 2

SYNTHÈSE DES LOIS DES COMMANDES

Chapitre 2 : Synthèse des lois des commandes

Introduction

Dans ce chapitre, nous procédons à la synthèse des différentes commandes exposées dans le chapitre précédent. L'objectif de commande pour chacune des approches étant la poursuite d'une trajectoire de référence pour un robot mobile uni-cycle.

2.1 La commande PD-MG d'ordre supérieur (Algorithme du supertwisting)

Pr. Ouayang dans [6] a proposé une commande par PD combinée à une commande à structure variable dans le domaine de position. L'objectif de l'ajout de la commande discontinue est de rendre robuste la commande PD classique .

La commande PD-MG classique [6] est donnée comme suit :

$$\begin{cases} u_1(t) = K_{P_x}e_x(t) + K_{D_x}\dot{e}_x(t) + K_{P_y}e_y(t) + K_{D_y}\dot{e}_y(t) + K_s \text{sign}(S) \\ u_2(t) = K_{P_\phi}e_\phi(t) + K_{D_\phi}\dot{e}_\phi(t) \\ S = \dot{e}_x(t) + \lambda_x e_x(t) + \dot{e}_y(t) + \lambda_y e_y(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

La nouvelle approche PD-MG-ST consiste à remplacer le terme discontinu $K_s \text{sign}(S)$ de la loi précédente par une commande u_{ST} de même nature mais qui est élaborée par l'algorithme du super twisting.

2.1.1 Commande dans le domaine temporel PD-MG d'ordre deux

$$\begin{cases} u_1(t) = K_{P_x}e_x(t) + K_{D_x}\dot{e}_x(t) + K_{P_y}e_y(t) + K_{D_y}\dot{e}_y(t) + u_{ST} \\ u_2(t) = K_{P_\phi}e_\phi(t) + K_{D_\phi}\dot{e}_\phi(t) \\ u_{ST} = -\alpha \|S\|^q \text{sign}(S) - \int \beta \text{sign}(S) \\ S = \dot{e}_x(t) + \lambda_x e_x(t) + \dot{e}_y(t) + \lambda_y e_y(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

2.1.2 Commande dans le domaine de position PDP-MG d'ordre deux

La nouvelle loi de commande PDP-MG-ST est similaire à la commande PD + MG dans le temps (Ouyang et al., 2014) et elle est définie comme (Ouyang, Pano, and Hu, 2015)

$$\begin{cases} u_m(t) = u_2(t) \\ u_s(q_m) = u_1(q_m) = K_{P_x}e_x(q_m) + K_{D_x}e'_x(q_m) + K_{P_y}e_y(q_m) + K_{D_y}e'_y(q_m) + u_{ST} \\ u_{ST}(q_m) = -\alpha\|S_p\|^q \text{sign}(S_p) - \int \beta \text{sign}(S_p) \\ S_p = e'_x(q_m) + \lambda_x e_x(q_m) + e'_y(q_m) + \lambda_y e_y(q_m) \end{cases} \quad (2.3)$$

Où $e_s(q_m)$ et $e'_s(q_m)$ représentent l'erreur de poursuite et la dérivée relative première de cette dernière, avec $e_s(q_m) = q_{sd}(q_m) - q_s(q_m)$, S_p est la surface de glissement définie dans le domaine de position et sign est la fonction signe, K_{pi} et K_{di} représentent les gains proportionnels et dérivés. $\lambda_x > 0$ et $\lambda_y > 0$ sont des gains positifs qui représentent les constantes de glissement.

2.2 La commande PD-MGT

La surface usuelle de Slotine définie dans la section précédente est remplacée par une surface non linéaire afin que le système converge très rapidement. Cette surface est définie dans les deux prochaines sous-sections.

2.2.1 Commande dans le domaine temporel PD-MGT

$$\begin{cases} u_1(t) = K_{P_x}e_x(t) + K_{D_x}\dot{e}_x(t) + K_{P_y}e_y(t) + K_{D_y}\dot{e}_y(t) + K_s \text{sign}(S_{TSMC}) \\ u_2(t) = K_{P_\phi}e_\phi(t) + K_{D_\phi}\dot{e}_\phi(t) \\ S_{TSMC} = K_x \dot{e}_x(t)^{\frac{p}{q}} + e_x(t) + K_y \dot{e}_y(t)^{\frac{p}{q}} + e_y(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.2 Commande dans le domaine de position PDP-MGT

La nouvelle loi de commande PDP-MG est similaire à la commande PD + MG dans le temps et elle est définie par

$$\begin{cases} u_m(t) = u_2(t) \\ u_s(q_m) = u_1(q_m) = K_{Px}e_x(q_m) + K_{Dx}e'_x(q_m) + K_{Py}e_y(q_m) + K_{Dy}e'_y(q_m) + K_s \text{sign}(S_{PTSMC}) \\ S_{PTSMC} = K_x e'_x(q_m)^{\frac{p}{q}} + e_x(q_m) + K_y e'_y(q_m)^{\frac{p}{q}} + e_y(q_m) \end{cases} \quad (2.5)$$

Où $e_s(q_m)$ et $e'_s(q_m)$ représentent l'erreur de poursuite et la dérivée relative première de cette dernière, avec $e_s(q_m) = q_{sd}(q_m) - q_s(q_m)$, S_p est la surface de glissement définie dans le domaine de position et sign est la fonction signe, K_{p_i} et K_{d_i} représentent les gains proportionnels et dérivés. $\lambda_x > 0$ et $\lambda_y > 0$ sont des gains positifs qui représentent les constantes de glissement.

2.3 Synthèse de la commande CAI-MGF

L'association de la commande par apprentissage itératif et la commande par modes glissants-floues qui combine les caractéristiques de la commande floue et la commande par modes glissants a donné naissance à une nouvelle loi de commande appelée commande CAI-MGF(FSM-ILC).

Celle-ci peut être vue comme une extension améliorée en terme de simplicité de mise en œuvre de l'algorithme CAI-MG.

la commande CAI-MG se présente comme suit :

$$\begin{cases} u_k(x_k, t) = u_{eq,k}(x_k, t) + v_k(t) \\ v_k(t) = v_{k-1}(t) + \alpha_k(t)S(x_k) + \beta_k(t)S(\dot{x}_k) \end{cases} \quad (2.6)$$

On pose /

$$w_k(t) = \alpha_k(t)S(x_k) + \beta_k(t)S(\dot{x}_k) \quad (2.7)$$

D'où :

$$u_k(x_k, t) = u_{eq,k}(x_k, t) + v_{k-1}(t) + w_k(t) \quad (2.8)$$

Ainsi l'idée de la commande CAI-MGF consiste à considérer le terme $w_k(t)$ comme inconnu (ou flou), et en respectant la condition du mode de glissement $S_k \dot{S}_k < 0$ on construit une table de règles floues (règles d'inférence) comme suit :

| | | | |
|-----------|-----|------|-----|
| S | N | ZE | P |
| \dot{S} | NVB | NS | PM |
| | NB | ZE | PB |
| | NM | PS | PVB |

FIGURE 2.1 – Règles d'inférence

Avec les notations suivantes :

NVB : Négative Very Big

NB : Négative Big

NM : Négative Medium

NS : Négative Small

ZE : Zéro

PS : Positive Small

PM : Positive Moyen

PB : Positive Big

PVB : Positive Very Big

Donc, à chaque itération de l'algorithme itératif, le terme $w_k(t)$ sera évolué suivant les valeurs que prennent S_k et \dot{S}_k .

Dans notre application au robot mobile, nous avons choisi un régulateur flou de type Sugeno d'ordre zéro, les fonctions d'appartenance sont de forme triangulaire pour les deux variables d'entrée S_k et \dot{S}_k , et de forme singleton pour la variable de sortie $w_k(t)$. L'inférence est réalisée par la méthode SOMME-PRODUIT et la méthode du centre de gravité est utilisée pour le calcul de la commande totale.

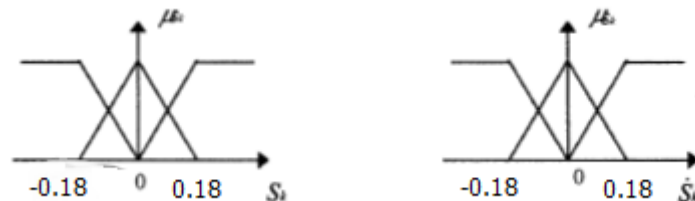


FIGURE 2.2 – Fonctions d'appartenance des entrées

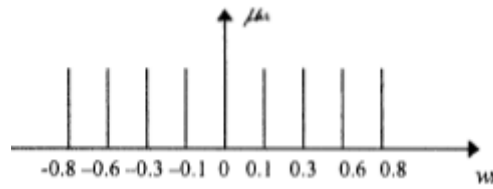


FIGURE 2.3 – Fonctions d'appartenance de la sortie

La surface de commutation est définie par :

$$S_k(t) = \dot{e}_{x,k}(t) + \lambda_x e_{x,k}(t) + \dot{e}_{y,k}(t) + \lambda_y e_{y,k}(t) \quad (2.9)$$

Conclusion

Nous avons synthétisé les lois de commandes avancées pour le système étudié. Nous simulons les réponses dynamiques dans les domaines temporels et de position dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

SIMULATION ET RÉSULTATS

Chapitre 3 : Simulation et Résultats

3.1 Configuration de la simulation

Soit le robot mobile de type uni cycle décrit dans la figure(3.1) et dont les propriétés et le modèle dynamiques sont décrits dans [1] et [6]. Les paramètres mécaniques du robot sont regroupés dans le tableau (3.1)

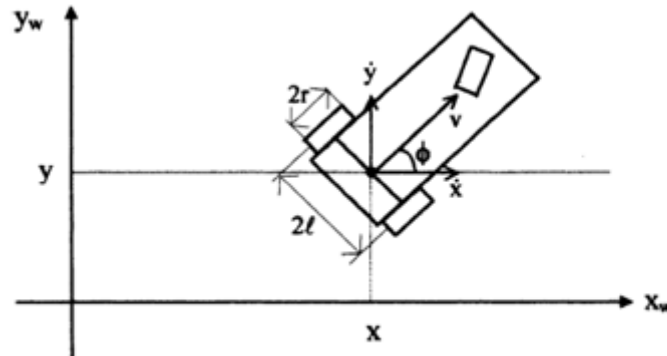


FIGURE 3.1 – Robot mobile uni-cycle [1]

| Masse $m[\text{kg}]$ | Inertie $I[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ | Distance entre une roue et l'axe central du véhicule |
|-------------------------|--|--|
| 4 | 3.75 | 0.15 |

TABLE 3.1 – Paramètres du Robot Mobile

3.2 Résultats des simulations

Pour les deux sections suivantes, les résultats des simulations seront comparés tout d'abord par rapport aux commandes PD-MG et PDP-MG utilisées afin d'observer les améliorations apportées par les nouvelles techniques.

Ensuite, les performances des nouvelles commandes temporelles et leurs homologues synthétisées dans le domaine de position sont comparées.

3.2.1 Les commandes PD-MG et PDP-MG

On présente les résultats obtenus dans [7]

Résultats de suivi du contour arc

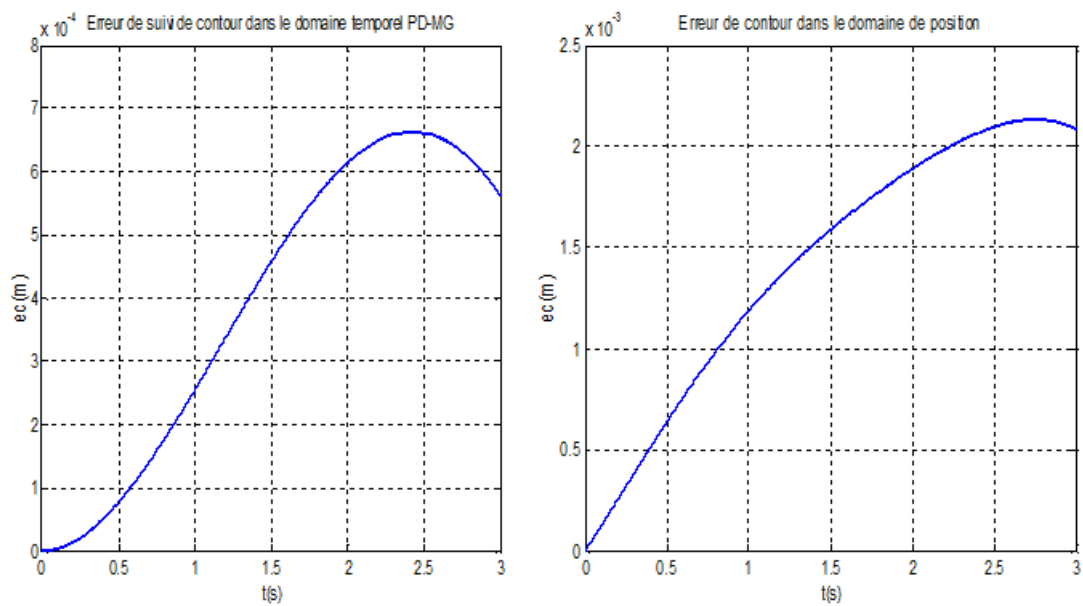


FIGURE 3.2 – Erreurs de suivi du contour (contour arc) pour les méthodes PD-MG/PDP-MG

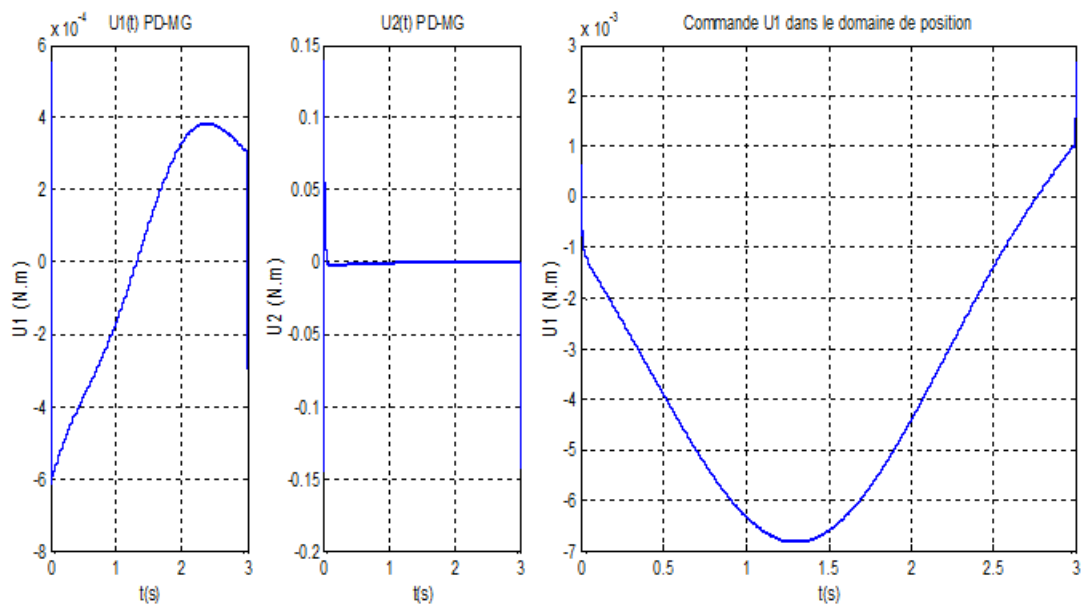


FIGURE 3.3 – Signaux de commande pour les méthodes PD-MG/PDP-MG

3.2.2 La commande PD-MG d'ordre supérieur (Algorithme du supertwisting)

On reprend les résultats établies lors du chapitre 3 :

les paramètres du régulateur :

les paramètres choisis sont regroupées dans le tableau suivant : Ces paramètres ont les

| | Contour arc |
|--------------------|-------------|
| \mathbf{K}_{P_x} | 1.9 |
| \mathbf{K}_{D_x} | 0.69 |
| \mathbf{K}_{P_y} | 1.9 |
| \mathbf{K}_{D_y} | 0.69 |
| λ_x | 9.3 |
| λ_y | 9.3 |
| Φ_s | 0.03 |
| α | 0.1 |
| β | 0.3 |
| \mathbf{q} | 0.5 |

TABLE 3.2 – Paramètres du régulateur PD-MG d'ordre deux

memes valeurs que ce soit pour le réglage temporel ou celui dans le domaine de position.

Résultats de suivi du contour arc

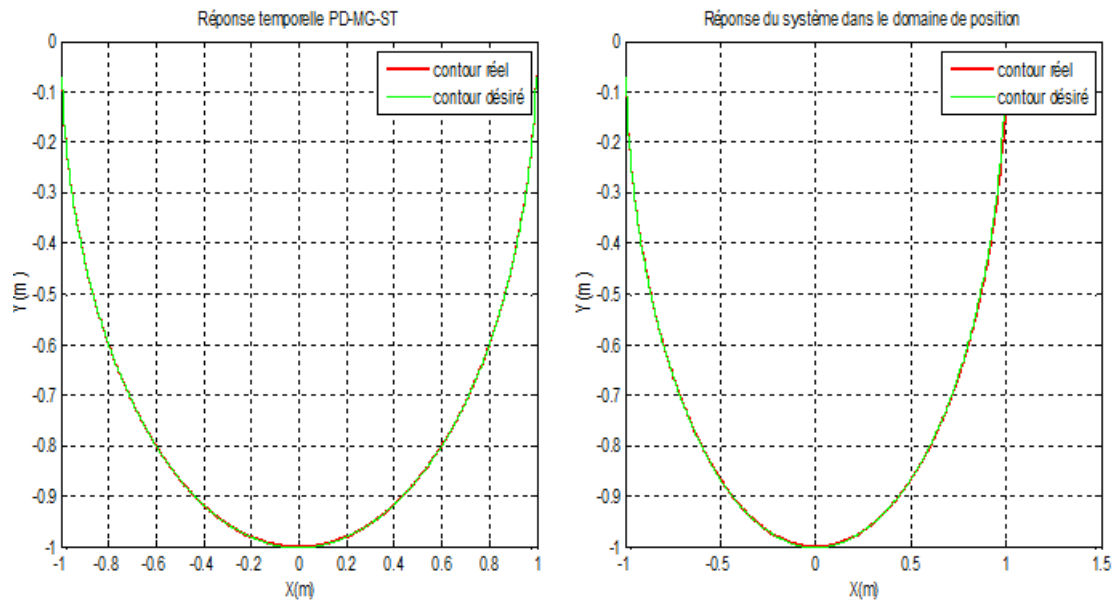


FIGURE 3.4 – Résultat de suivi du contour (contour arc)

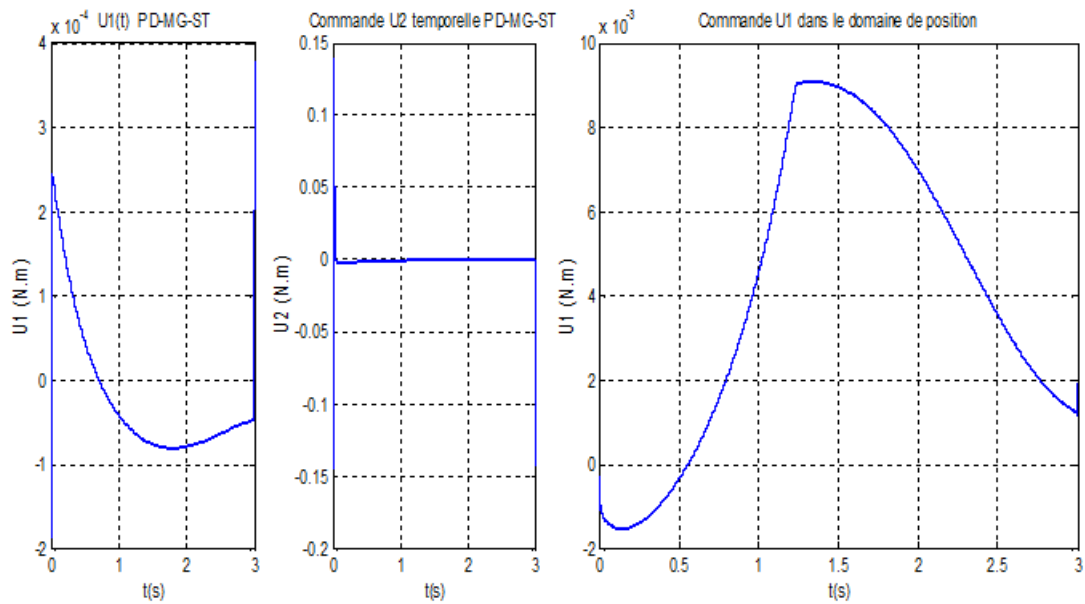


FIGURE 3.5 – Commandes dans le domaine temporel/position

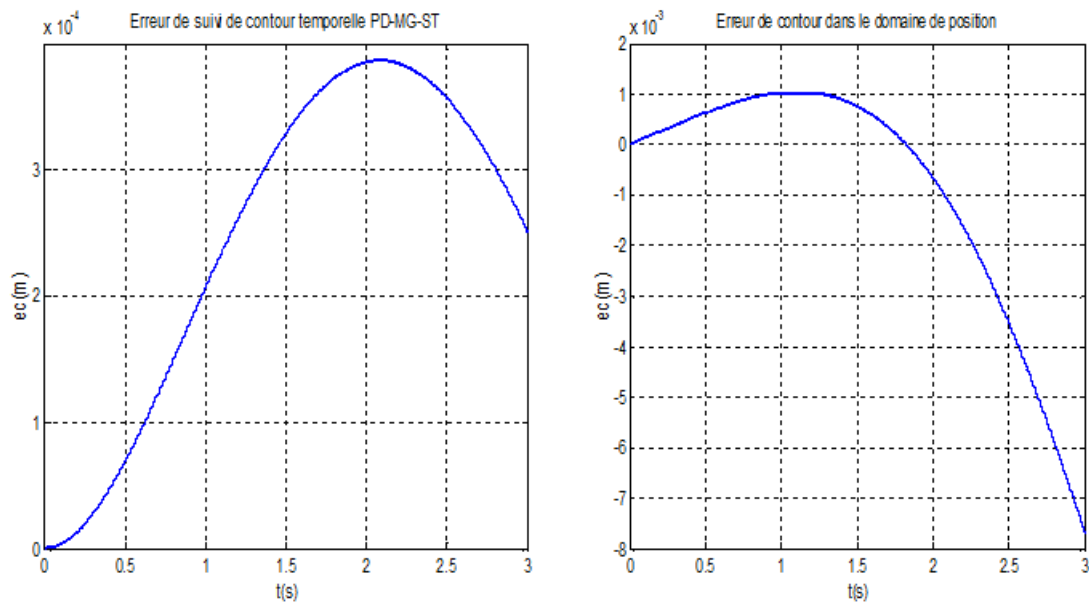


FIGURE 3.6 – erreurs de suivi de contour temporel/position

Commentaires

La commande dans le domaine de position n'a pu produire une erreur de contour moyenne inférieure à son homologue temporelle, ceci est due aux mauvais choix des paramètres de réglage qui nécessitent une optimisation par rapport à un critère spécifique ainsi que la difficulté de commander le modèle dynamique de notre système. On remarque aussi que la commande ($u_1(t)$) présente une variation brusque au début et à la fin de sa trajectoire ceci est expliqué par l'effet de l'action dérivée au début de la simulation. Cette variation est considérablement atténuée dans le domaine de position.

3.2.3 La commande PD-MGT)

On reprend les résultats établies lors du chapitre 3 :

les paramètres du régulateur :

les paramètres choisis sont regroupés dans le tableau suivant : Ces paramètres ont les mêmes valeurs que ce soit pour le réglage temporel ou celui dans le domaine de position.

| Contour arc | |
|-------------|-------|
| K_{P_x} | 1.9 |
| K_{D_x} | 0.69 |
| K_{P_y} | 1.9 |
| K_{D_y} | 0.69 |
| K_x | 0.9 |
| K_y | 0.9 |
| K_s | 0.001 |
| Φ_s | 0.03 |
| p | 5 |
| q | 3 |

TABLE 3.3 – Paramètres du régulateur PD-MGT d'ordre deux

Résultats de suivi du contour arc

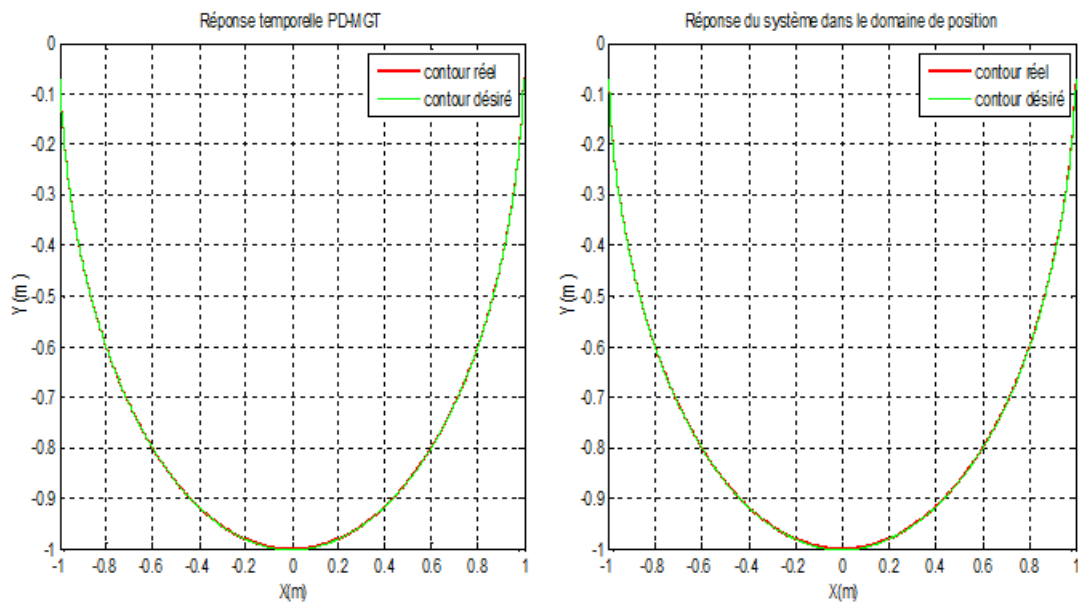


FIGURE 3.7 – Résultat de suivi du contour (contour arc)

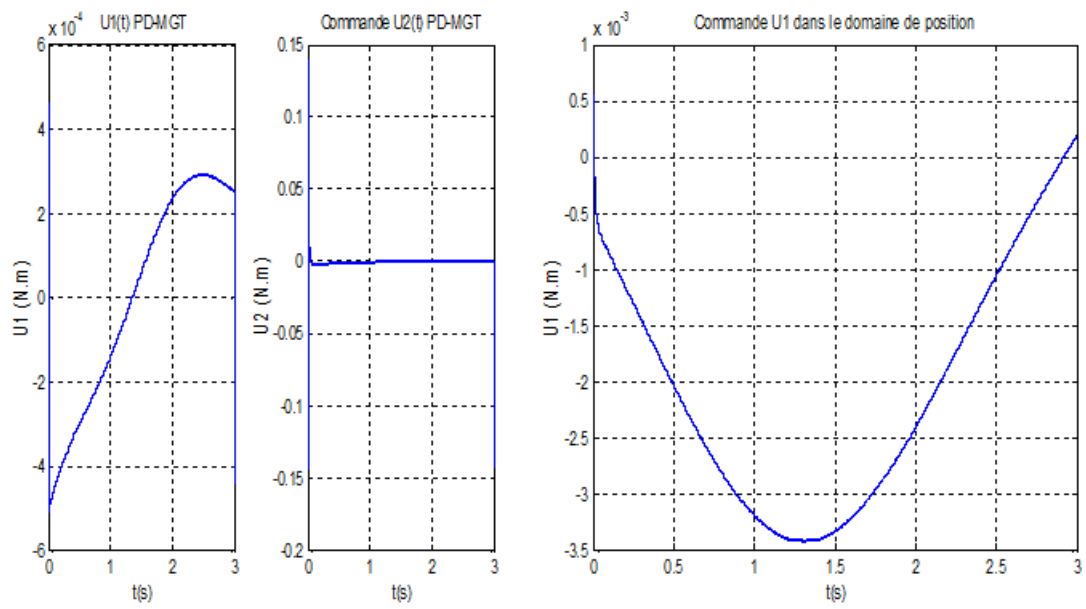


FIGURE 3.8 – Commandes dans le domaine temporel/position

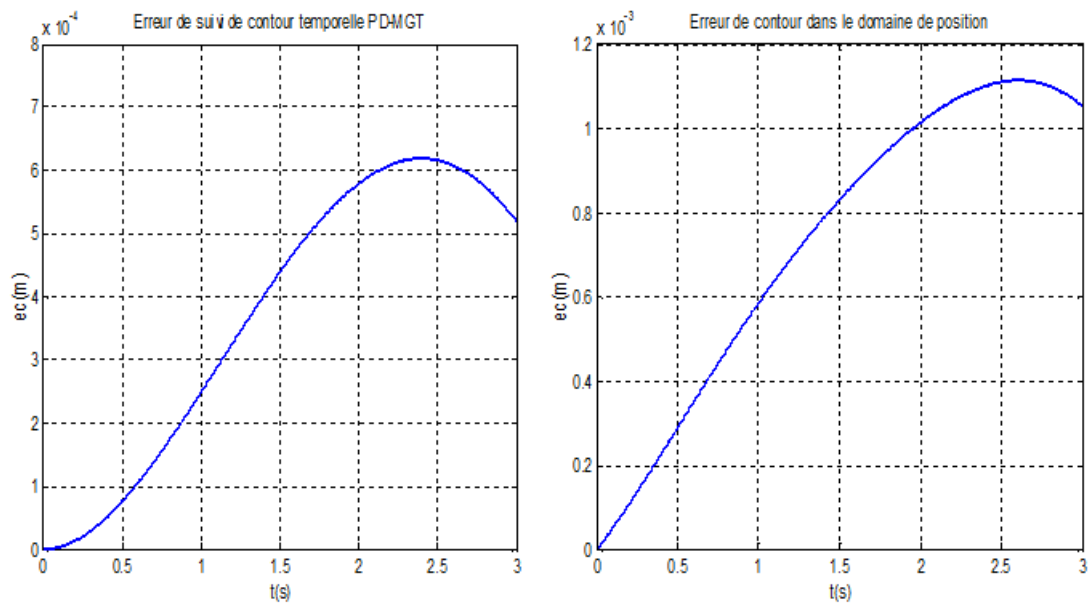


FIGURE 3.9 – erreurs de suivi de contour temporel/position

Commentaires

Les commandes dans le domaine de position a pu produire une erreur de contour moyenne approximativement égale à l'erreur de contour temporelle moyenne, ceci tout en gardant pratiquement le même signal commande, ce résultat reste intéressant vu qu'on obtient les même performance avec le PD-MGT dans le domaine temporel.

3.2.4 Commande par CAI-MGF

On applique la commande par logique floue synthétisée dans le chapitre précédent. Les constantes de la surface de glissement sont : $\lambda_x = 29.9$ et $\lambda_y = 29.63$

3.2.5 Résultat de la simulation

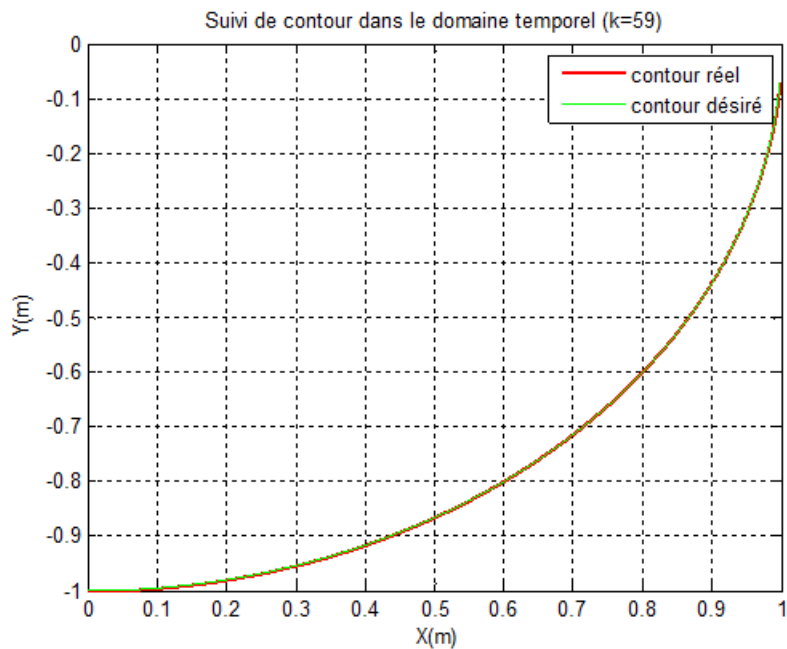


FIGURE 3.10 – Résultat de suivi du contour (contour arc) pour k=59

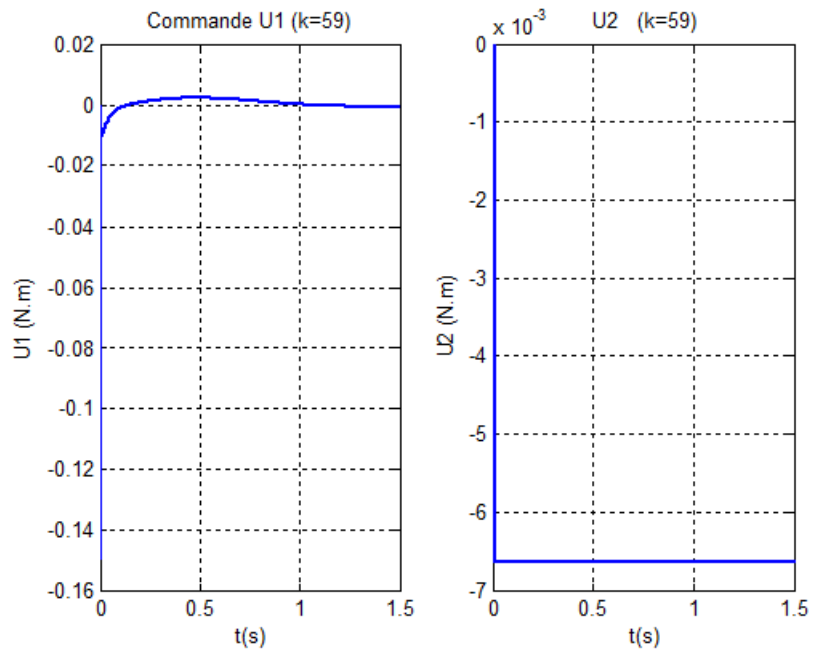
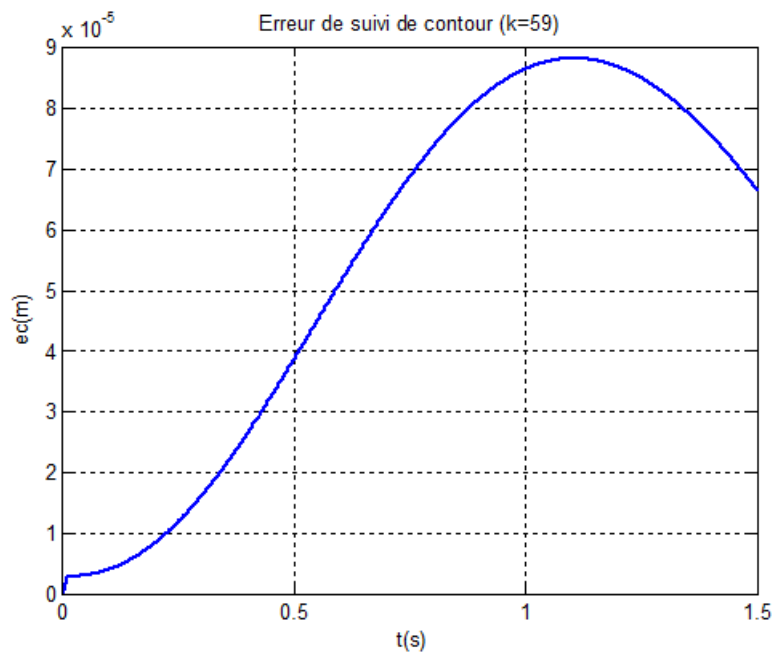
FIGURE 3.11 – Commandes par CAI-MGF pour $k=59$ 

FIGURE 3.12 – L'erreur de suivi de Contour (CAI-MGF)

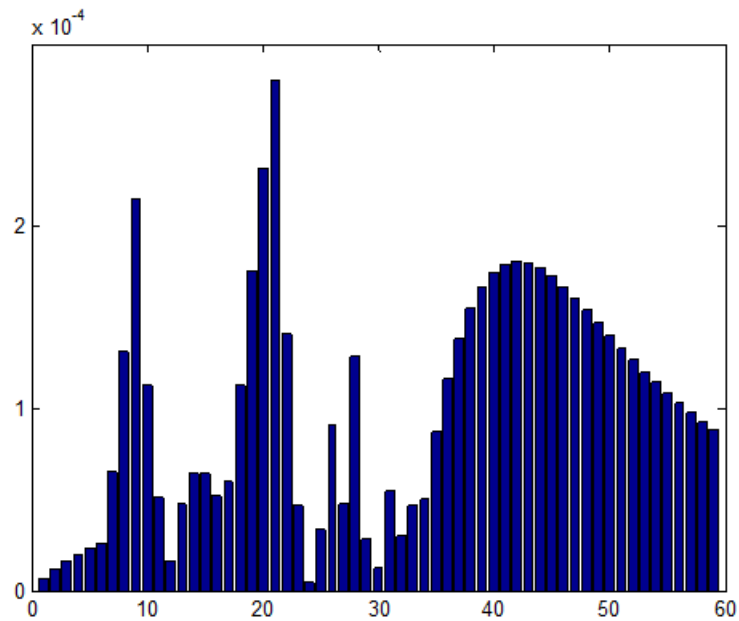


FIGURE 3.13 – Evolution de $\sup |E_c|$ au cours des itérations $k=59$

Commentaires

On remarque qu'il faut plus de 100 itérations pour améliorer la moyenne de l'erreur du contour, tout en gardant pratiquement la même énergie de commande.

On constate également qu'au cours des itérations, l'erreur de suivi de contour converge pratiquement vers zéro plus rapidement avec le contrôleur CAI-MGF. Aussi, la commande ne présente pas de pics importants, ce qui montre l'avantage de cet algorithme qui permet de faire converger parfaitement le système tout en évitant de trop exciter la commande.

Cependant le choix des formes des fonctions d'appartenance et leurs plages de variation n'est pas évident pour assurer une convergence optimale. Cela dépend de l'expertise de l'opérateur humain comme évoqué dans le chapitre précédent.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le développement de la technique de commande par mode glissant d'ordre supérieur dans le domaine temporel et de position appliquées au suivi de contours pour les robots manipulateur.

Les robots manipulateurs en particulier ont de nombreuses applications, de la production électrique et électronique aux interventions chirurgicales et à l'exploration spatiale. Un domaine de recherche important pour la robotique est le développement de systèmes de contrôle avancés dans le but d'améliorer la performance du suivi de contour, et c'est l'objectif principal de ce travail. En effet la motivation du choix de l'approche basée sur le domaine de position est qu'elle contribue efficacement à la réduction des erreurs de suivi de contour notamment dans les processus industriels et la robotique médicale exigeant une très haute performance de suivi de contour. On a expliqué pourquoi la méthode en position .

Dans ce mémoire, nous avons étudié la stabilité des commandes par mode glissant d'ordre 1 et 2 dans le domaine temporel et de position ,ainsi nous avons simulé ces commandes appliquées robot manipulateur et enfin faire une étude comparative entre eux en question de performance ,énergie ,rejet de perturbation et surtout l'élimination de l'effet de broutement .

Les résultats indiquent que des performances très améliorées ont été obtenues par les contrôleurs synthétisés dans le domaine de position par rapport à leurs équivalents temporels et pour la commande par mode glissant d'ordre 2 à celle d'ordre 1 . Cela se traduit par des erreurs de suivi inférieures pour les variables esclaves. Ce résultat a été appuyé par une étude comparative avancée concluant sur les aspects quantitatifs et qualitatifs de performance des deux approches de commandes temporelle et celle dans le domaine de position. En conclusion, nous pouvons dire que les résultats obtenus lors de l'application ont confirmé l'avantage et l'apport de l'approche de commande par mode glissant d'ordre 2 dans le domaine de position pour l'amélioration du suivi de contour. Les résultats obtenus nous permettent de conclure que les algorithmes de formulation de la nouvelle méthode de commande sont très efficaces pour et nous encouragent à l'explorer dans d'autres applications industrielles.

Ce travail peut faire l'objet de travaux futurs tels que :
Tout d'abord, des expériences pratiques devraient être effectuées pour valider les simulations et étudier toutes les difficultés imprévues.
Le contrôleur doit également être utilisé dans différentes configurations de robots (parallèles, spatiaux, etc.) ainsi que pour des formations de robots coordonnés.

Enfin, les contrôleurs dans le domaine de position utilisent des trajectoires de références différentes de leurs homologues définies dans le domaine temporel. Par conséquent, une technique d'optimisation de planification de la trajectoire transformée devrait être développée afin de définir des trajectoires dans le domaine de position qui produiraient les meilleures performances pour le contrôleur de domaine de position.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Pourboghrat, Farzad . Karlsson, P. Mattias. Adaptive Control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints. Computers and Electrical Engineering, 2002, Vol. 28, p 241–253.
- [2] Mezghani Ben Romdhane, Neila. Damak, Tarak. Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Rigid Robotic Manipulators. International Journal of Automation and Computing May 2011, Vol.8, p 215-220.
- [3] Demaya, B. Commande Floue Des Systèmes à Dynamique Complexe, Application à la commande d'un moteur thermique. Thèse de doctorat, 1994, Automatique et Informatique Industrielle, INSA, Toulouse.
- [4] Maolin, Jin. Jinh, Lee. Pyung, Hun Chang. Chintae, Choi. Practical Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Robot Manipulators for High-Accuracy Tracking Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, October 2009, Vol. 56, p 3593-3601
- [5] Guendouzi, Awatif. Boubakir, Ahcene. Hamerlain, Mustapha. Higher Order Sliding Mode Control of Robot Manipulator. The Ninth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, 2013, p 61-66. ISBN : 978-1-61208-257-8.
- [6] Ouyang, P.R., Acob, J., and Pano, V. PD with sliding mode control for trajectory tracking of robotic system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, Vol. 30, p 189-200 .
- [7] DAHMANI, M. L .BENKHELAT, I. *Commande non linéaire dans Le domaine de position : application aux systèmes robotisés*. Projet de fin d'étude : Génie Automatique, Alger, École Nationale Polytechnique, 2017, 130p.

- [8] P.R. Ouyang and T. Dam. *Position Domain PD Control for Contour Tracking*. Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2010), pp. 657-66 ,2010.