

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au département d'Electronique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : Electronique

Option : Electronique

Par

KHESRANI Samia

THEME

***Contribution à la modélisation et à la commande
des systèmes robotiques***

Soutenue le .../...../..... devant le Jury:

CHEMALI Hamimi	Professeur	Univ. F. Abbas Sétif 1	Président
HASSAM Abdelouahab	Professeur	Univ. F. Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
SAIDI Lamir	Professeur	Univ. Batna 2	Examineur
SRAIRI Kamel	Professeur	Univ. Biskra	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail

*À mes parents, à mon fils, à toute ma
famille et à mes ami(e)s*

Remerciements

Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette thèse du doctorat.

Je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement mon directeur de recherche, le Professeur **HASSAM Abdelouahab**, qui a accepté de diriger mes travaux de recherche, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant la réalisation de ma thèse.

Je remercie également tous les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'évaluer cette thèse :

Monsieur **CHEMALI Hamimi**, Professeur à l'Université de Sétif 1, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Messieurs **SAIDI Lamir**, Professeur à l'Université de Batna 2, et **SRAIRI Kamel**, Professeur à l'Université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Dr. **BOUTALBI Oussama** et Dr. **BOBEZOULA Mabrouk** et Dr. **KERKAR Nora** pour leurs conseils au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je remercie mes parents, mes frères et ma sœur qui m'ont assisté moralement.

Enfin, pour tous ceux qui, de près ou de loin, ont rendu ce travail possible.

Table des matières

Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Objectif de la thèse :.....	3
2. Organisation du document.....	3
3. Contribution de la thèse :.....	4
 <i>CHAPITRE I</i>	 <i>7</i>
MODELISATION DES ROBOTS MOBILES.....	7
I.1. Introduction.....	7
I.2. Généralités sur la robotique mobiles.....	7
I.2.1. Classification des robots.....	7
I.2.1.1. Robot de type unicycle.....	10
I.2.1.2. Robot de type tricycle.....	10
I.2.1.3. Robot de type voiture.....	10
I.2.1.4. Robot omnidirectionnel.....	11
I.2.2. L'ensemble des composantes d'un robot:.....	11
I.2.2.1. Les Capteurs.....	12
I.2.2.2. Les Actionneurs.....	13
I.2.3. L'Unité de traitement.....	13
I.3. Modélisation.....	13
I.3.1. Introduction.....	13
I.3.2. Modélisation Cinématique.....	14
I.3.2.1. Systèmes de coordonnée.....	14
I.3.2.2. Modélisation des contraintes cinématiques:.....	15
I.3.2.3. Hypothèse 1.....	15
I.3.2.4. Hypothèse 2.....	16
I.3.2.5. Modèle cinématique du robot mobile unicycle.....	16
I.3.3. Modélisation dynamique.....	19
I.4. Conclusion.....	24

CHAPITRE II..... 25

PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE DES SYSTEMES

ROBOTIQUES NON HOLONOMES 25

II.1. Introduction.....	25
II.2. Planification du mouvement.....	25
II.2.1. Définition du chemin.....	26
II.2.2. Définition de trajectoire.....	26
II.3. Contraintes de planification.....	27
II.3.1. Contraintes cinématiques différentielles.....	28
II.3.2. Contraintes dynamiques.....	29
II.4. Un état de l'art sur les techniques de planification.....	30
II.4.1. Planification du chemin.....	30
II.4.2. Planification de trajectoire.....	32
II.5. Mouvement point à point (PTP).....	33
II.5.1. Fonctions harmoniques.....	34
II.5.2. Fonctions Bang Bang.....	35
II.5.3. Fonctions polynomiales.....	35
II.6. Suivi des trajectoires.....	39
II.6.1. Commande PID.....	39
II.6.2. Commande par linéarisation.....	40
II.6.3. Commande par Backstepping.....	41
II.6.4. Commande par mode glissant.....	42
II.6.5. Commande adaptative.....	43
II.6.6. Commande par platitude.....	43

CHAPITRE III..... 46

COMMANDE D'UN ROBOT MOBILE AVEC DES

CONTRAINTES NON-HOLONOMES..... 46

III.1. Introduction.....	46
III.2. Modélisation et Commande d'un Robot mobile à roues différentielles.....	46
III.2.1. Modélisation du Pioneer 3DX.....	46
III.2.2. Propriétés du modèle et présentation générale de la conception de commande.....	49
III.3. Planification de trajectoire sous les contraintes non-holonomes.....	49

III.4. Conception de la loi de commande.....	52
III.5. Résultats et discussions	56
III.5.1. Évaluation de l'algorithme de planification des trajectoires	56
III.5.2. Résultats de la simulation sans erreur initiale et perturbation.....	58
III.5.3. Résultats de simulation avec différents paramètres	62
III.5.4. Résultats de simulation avec une erreur initiale.....	67
III.5.5. Résultats de simulation avec perturbation.....	69
III.6. Conclusion	71
 <i>CHAPITRE IV</i>	 72
COMMANDE DU MANIPULATEUR AVEC L'APPROCHE	
PLATITUDE FLOUE	72
IV.1. Introduction	72
IV.2. Les manipulateurs mobiles à roues	72
IV.3. Modélisation cinématique du manipulateur mobile à roues (MMR).....	73
IV.4. Concept de la commande du MMR.....	74
IV.4.1. Principe de fonctionnement de la platitude pour le MMR	74
IV.4.2. Planification des trajectoires.....	76
IV.4.3. Conception du contrôleur	78
IV.4.4. Résultats de simulation.....	81
IV.5. Conclusion.....	86
CONCLUSION GENERALE	87
Bibliographies.....	89

Liste des figures

Figure I.1 Robot mobile Pioneer 3DX.....	10
Robot mobile tricycle.....	10
Figure I.3 Robot mobile de type voiture.....	11
Figure I.4 Robot mobile de type omnidirectionnel.....	11
Figure II.1 Chemin lisse dans le plan.....	26
Figure II.2 Schéma illustratif de la planification de trajectoire.....	27
Figure II.3 Profils de position, de vitesse et d'accélération pour un polynôme cubique.....	37
Figure II.4 Profils de position, de vitesse et d'accélération pour un polynôme quintique.....	39
Figure III.1 Robot mobile à deux roues différentielles: Pioneer 3DX.....	47
Figure III.2 Le bloc diagramme de la technique proposée.....	54
Figure III.3 Les fonctions d'appartenances des entrées et des sorties du contrôleur flou.....	55
Figure III.4 Planification de la trajectoire avec différents cas de θ_f	57
Figure III.5 Planification de la trajectoire avec différents cas de k	57
Figure III.6 Les coordonnées de Pioneer 3dx en fonction du temps: $x(t)$ et $y(t)$	58
Figure III.7 Fonction de profil de mouvement $s(t)$	59
Figure III.8 Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée.....	60
Figure III.9 Erreur de suivi de trajectoire.....	61
Figure III.10 Vitesse linéaire le long du chemin.....	62
Figure III.11 Paramètre des gains du contrôleur proposé.....	62
Figure III.12 Résultats de la simulation avec $p_1 = q_1 = 0,75, p_2 = q_2 = 0,1$	64
Figure III.13 Résultats de la simulation avec $p_1 = q_1 = 0,35, p_2 = q_2 = 0,05$	65
Figure III.14 Résultats de la simulation avec $p_1 = q_1 = p_2 = q_2 = 0$	66
Figure III.15 Résultats de simulation avec une erreur initiale $e_1 = e_2 = 0,02m$	69
Figure III.16 Résultats de simulation avec perturbation d'amplitude $0,04m/s$	71
Figure IV.1 Le modèle simplifié du MMR.....	73
Figure IV.2 Bloc diagramme synoptique du contrôleur proposé.....	79

Figure IV.3 Les fonctions d'appartenance du contrôleur flou :(a) les variables d'entrées avec : N est négatif, Z est zéro et P est positif. (b) les variables de sorties avec Z est zéro, P est positif, PS est positif petit, PM est positif moyen et PB est positif grand 80

Figure IV.4 Les résultats de simulation des trajectoires d'états (a) $x(t)$ (b) $y(t)$ (c) trajectoire de la plateforme mobile sur le simulateur MobileSim (d) $\theta(t)$ (e) $\theta_1(t)$ and (f) $\theta_2(t)$ 83

Figure IV.5 Les résultats de simulation de l'erreur (a) e_1 et e_2 (b) e_3 et e_4 84

Figure IV.6 Les résultats de simulation des entrées de commande (a) $v(t)$ (b) $w(t)$ (c) $u_1(t)$ $u_2(t)$ 85

Liste des tableaux

Tableau III.1 Conditions terminales des variables d'état.....	52
Tableau III.2 Les règles d'inférence du contrôleur flou	55
Tableau III.3 Les caractéristiques principales des différentes courbes planifiées.....	57
Tableau III.4 Les performances du contrôleur	67
Tableau IV.1 La relation entre les sorties plates et l'espace d'état (diffeomorphisme) du MMR.	75
Tableau IV.2 les conditions terminales des sorties plates.....	77
Tableau IV.4 Les règles d'inférence du contrôleur flou.....	81

INTRODUCTION GENERALE

La commande des systèmes robotiques a connu une grande importance ces dernières années, en raison de leur large utilisation dans les différents domaines tels que la fabrication industrielle, l'éducation, la santé et les applications militaires et de leur intervention dans les milieux où l'être humain ne peut pas agir.

Les bras de robots, les robots mobiles et les robots manipulateurs sont des robots qui ont une architecture simple et peuvent fonctionner dans différents environnements et opérer dans des endroits limités et font partie de nombreux types de systèmes robotiques qui nécessitent une commande. Pour chaque type du système robotique étudié, le contrôle doit être conçu en tenant compte des mouvements cinématiques et du comportement dynamique.

Avant de contrôler un système robotique quelconque, un modèle mathématique est obligatoire. De ce fait, la littérature propose deux approches différentes de modélisation qui sont la modélisation cinématique et la modélisation dynamique. Dans un modèle cinématique, seul le mouvement du robot est considéré et la commande peut se faire en tenant compte des contraintes non holonomes. Le modèle cinématique est facile à se dériver et sa représentation est généralement simple. Cependant, ce modèle cinématique ne tient pas compte de l'accélération, de ce fait son évolution peut être différente du mouvement réel lorsque les limites de maniabilité du robot sont atteintes. En raison de sa simplicité, il est largement utilisé pour la conception et l'élaboration de contrôleurs robustes.

Par contre, la modélisation dynamique tient généralement compte des caractéristiques du robot liées à son accélération, telle que la masse, le centre de gravité, l'adhérence des roues. Ce type de modélisation est plus fidèle à la conduite réelle du robot mais la représentation mathématique du système qui en découle est beaucoup plus compliquée.

La robotique prend désormais beaucoup de place dans notre vie quotidienne et dans plusieurs domaines de l'automatisation de l'industrie moderne et des applications cyber-physiques. Cela nécessite d'intégrer l'intelligence dans ces robots pour garantir des solutions (presque) optimales à l'exécution des tâches. Ainsi, de nombreux problèmes de recherche liés aux applications robotiques sont apparus tels que la conception, la modélisation, la perception de l'environnement, la planification (chemin, mouvement et mission), les problèmes d'attribution des tâches, la navigation et le suivi.

Les travaux de cette thèse sont focalisés sur le traitement et l'analyse des problèmes que posent les problèmes de commande et de planification des mouvements du robot prenant en

compte des différentes limites reliées aux systèmes lui-même et son environnement de fonctionnement afin d'optimiser les performances du système robotisé.

En ce qui concerne les robots mobiles à roues, généralement trois cas peuvent se présenter à savoir : le suivi de chemin, le suivi de trajectoire et la stabilisation de configuration fixe.

Une tâche de mouvement robotique est spécifiée en définissant une trajectoire le long de laquelle le robot doit se déplacer. Un chemin est une séquence de points définis en coordonnées du système. Le problème de la génération de trajectoire est de calculer pour le système de commande les variables de référence souhaitée en fonction du temps de telle sorte que le robot suive la trajectoire désirée. Ainsi, une trajectoire fait référence à un chemin et à une histoire temporelle le long du chemin.

Les trajectoires d'un robot peuvent être classées comme suit :

- trajectoire entre deux points avec un chemin libre entre eux ;
- trajectoire entre deux points via une séquence de points intermédiaires souhaités, également appelés points de passage, avec chemins libres entre points de passage ;
- trajectoire entre deux points avec chemin contraint entre les points (segment de dent droit par exemple) ;
- trajectoire entre deux points qui passe par des points intermédiaires sur un chemin contraint [1] .

Le problème de génération de trajectoires pour les robots consiste donc à fournir un ensemble de trajectoires « lisses » et respectant certaines conditions aux limites. En [2] les auteurs présentent une méthode pour générer des trajectoires continues de courbure pour lesquelles le profil de courbure est une fonction polynomiale de la longueur de l'arc.

Une question fréquemment posée en infographie est de savoir comment déplacer un objet le long d'une courbe paramétrée à vitesse constante. La méthode pour ce faire nécessite que la courbe soit reparamétrée par la longueur de l'arc. Un problème plus général est de spécifier la vitesse de l'objet en tout point de la courbe. Cela nécessite également la notion de reparamétrisation de la courbe [3]. Le travail que nous présentons aussi dans cette thèse est un éventail de lois de commande permettant de contrôler le robot, où on a préféré d'utiliser la technique de commande par platitude différentielle qui a été introduite par Michel Fliess [4] [5] [6]. C'est une propriété de certains systèmes non linéaires où le choix de la sortie plate peut transformer un système non linéaire en un système linéaire. Cependant, pour démontrer que le système est différentiellement plat, il est nécessaire de trouver que tous les états et les entrées du système peuvent être exprimés par l'ensemble des sorties plates et leurs dérivées. Par

conséquent, le nombre de sorties plates doit être égal au nombre d'entrées du système.

1.Objectif de la thèse :

Le point primordial de la commande en robotique est d'obtenir le mouvement requis d'un robot pour exécuter une tâche bien déterminée. L'objet de la commande porte sur le comportement dynamique du robot dans son espace de travail. La modélisation cinématique d'un robot est une étape importante pour la synthèse de sa loi de commande. L'utilisation d'un modèle mathématique du robot permet d'établir des lois de commande performantes, en particulier pour suivre une trajectoire précisément. Sur le plan théorique et des outils de synthèse, cette problématique dépasse largement le cadre de la robotique. Le défi est donc de proposer des méthodes de synthèse de commande permettant d'atteindre les performances les plus élevées possibles tout en garantissant leur robustesse et la maîtrise de la complexité de la loi de commande à implémenter.

Cette thèse présente une technique de commande basée sur la platitude et la logique floue pour le robot mobile avec des contraintes non holonomes ainsi que pour le manipulateur mobile à roues. Une approche de planification découplée «chemin-trajectoire» est d'abord définie pour assurer la génération de trajectoires de référence en respectant les contraintes non holonomes [7] [8]. Une loi de commande de rétroaction endogène auto-ajustée est alors conçue pour assurer un bon suivi des trajectoires désirées malgré les incertitudes. Les gains du contrôleur sont ajustés en ligne à l'aide d'un contrôleur flou approprié. Sur la base de l'algorithme développé et du prototype de test, Pioneer-3dx, des résultats de simulation ont été effectués pour évaluer les performances de l'approche proposée.

2.Organisation du document

Le 1^{er} chapitre de ce document présente l'une des premières étapes dans l'étude des robots qui consiste à définir la classe du robot selon les différentes actions à mener, le type de robot, ainsi que les différents éléments qui le constituent. Une fois ceci fait, il sera possible de développer des algorithmes permettant de le commander. Nous commençons par la présentation des différentes classes des robots, ensuite des différents blocs (les capteurs, l'unité de calculs et les actionneurs) qui le constituent. Après, les notions telles que l'holonomie et la non-holonomie ainsi que les équations cinématiques et dynamiques, du robot mobile de type uni cycle seront présentées, où ces contraintes dynamiques sont de deux types : celles qui concernent l'environnement (présence de mobiles), et celles qui concernent le système robotique (sa dynamique).

Le deuxième chapitre introduit une revue bibliographique sur deux domaines qui sont : la planification et la commande des mouvements. Pour le traitement du problème de planification de trajectoire, différents algorithmes sont proposés dans la littérature sous différentes conditions d'optimalité et d'exigences. L'environnement et la structure du robot détermineront laquelle des stratégies de planification décrites dans ce chapitre est la plus adaptée à la situation qui nous intéresse où notre étude est concentrée essentiellement sur l'approche dite découplée qui consiste à décomposer la phase de planification en deux étapes, une phase pour la définition de chemin sûr et sans collisions et une phase pour la génération des trajectoires le long du chemin planifié. Le module responsable de la réalisation des tâches planifiées est notre deuxième préoccupation dans ce chapitre. La commande des robots d'un point de départ à un point d'arrivée nécessite la connaissance des lois de commande. Plusieurs travaux ont été menés concernant ces techniques de commande.

Le troisième chapitre est réservé au détail de la contribution de cette thèse. Dans un premier temps, on a abordé le problème de planification des mouvements de robots mobiles avec des contraintes non holonomes. Le concept de la commande par platitude et l'algorithme d'auto-ajusté du contrôleur flou est ensuite proposé pour assurer une exécution précise des tâches planifiées. Une étude comparative a été faite pour prouver l'efficacité de l'approche proposée. Les résultats de simulation ont été présentés en utilisant le prototype du laboratoire Pioneer 3DX.

Le quatrième chapitre présente une stratégie de commande qui repose sur le couplage entre deux techniques qui sont la platitude différentielle et la logique floue pour le manipulateur mobile à roues. L'objectif est de construire un nouveau système de commande capable de gérer une classe de manipulateurs mobiles très efficaces. La technique de platitude est exploitée pour éliminer les effets de non-linéarité et pour assurer le calcul de trajectoires optimales sans l'intégration des équations différentielles de sorte que toutes les trajectoires du système soient polynomiales. Ainsi, le contrôleur flou est utilisé pour régler les paramètres du contrôleur de platitude en temps réel. De plus, le logiciel MobileSim est utilisé pour simuler le comportement du robot en réalité virtuelle. On termine la thèse par une conclusion qui résume et discute les résultats des travaux réalisés et quelques perspectives.

3. Contribution de la thèse :

De nombreuses recherches sont effectuées pour contrôler le mouvement d'un robot mobile notamment pour le suivi de trajectoire. Certaines utilisent un modèle perturbé du robot, en tenant compte des incertitudes du modèle, d'autres se concentrent sur le modèle cinématique pour concevoir des lois de commande fournissant une stabilité asymptotique de tout le système en

utilisant la théorie de Lyapunov. D'autres travaux utilisent le modèle dynamique en présence d'incertitudes et de perturbations limitées. Plusieurs travaux utilisent le contrôle de suivi de trajectoires pour un robot par l'approche de la platitude et d'autres par le contrôleur flou (FLC). Notre objectif dans ce travail vise essentiellement les différents aspects qui n'ont pas été abordés et traités dans la littérature, en orientant notre méthodologie sur la mise en œuvre d'un modèle de contrôle qui doit permettre l'introduction de nouvelles stratégies de commande pour les systèmes robotiques. Pour cela on propose de nouvelles solutions en utilisant le développement de plusieurs techniques de commande non linéaires [9].

Ce type de contraintes réduit l'espace des solutions possibles pour les problèmes de planification de mouvement et de conception de commande. Principalement, cela implique que le robot s'appartient à la classe des systèmes qui: (i) ne peuvent pas être stabilisés par un contrôleur lisse invariant dans le temps, (ii) n'acceptent pas l'extension des contrôleurs spéciaux développés pour le suivi de trajectoires pour résoudre le problème de régulation, et vice versa, (iii) nécessitent une attention particulière supplémentaire dans la phase de conception des trajectoires désirées pour assurer la planification des trajectoires réalisables.

Plusieurs méthodes ont été proposées et appliquées pour résoudre les tâches de régulation et de suivi de trajectoire des robots mobiles. Ces méthodes vont par des techniques de mode glissant [10] [11] [12], du back-stepping [13], des approches de réseaux de neurones (intelligence artificielle) [14], des contrôleurs variant dans le temps basés sur Lyapunov [15] [16]. On peut citer un aperçu des approches principales pour la planification de trajectoire et le contrôle de mouvement de rétroaction sur [17].

Nous pouvons distinguer une approche de linéarisation dynamique de rétroaction, qui est un outil de conception efficace valable pour la conception de commande en boucle ouverte (planification de trajectoire) [4], le suivi de trajectoire et les problèmes de régulation [11] [18] [19]. Une propriété importante des systèmes de rétroaction linéarisable est la platitude différentielle [20] [21]. Il est fortement lié à la propriété de contrôlabilité structurelle. En tant qu'extension des sorties Brunovsky [22] des systèmes linéaires contrôlables aux processus non linéaires, ce concept s'est avéré très puissant pour l'analyse et la conception de suivi de commande de rétroaction en boucle ouverte et pour la stabilisation des systèmes non linéaires de dimensions finis [22] [23] [24] [25]. La propriété de platitude a été donc utilisée pour la commande des systèmes continus non linéaires avec de bonnes performances en termes de suivi de trajectoire [26]. Compte tenu des tâches de régulation et de contrôle de suivi, cette approche conduit toujours au nième ordre de la loi de commande de rétroaction endogène qui doit être

soigneusement conçue pour garantir les performances du système. Ainsi, une question soulevée immédiatement concernant la régulation efficace des paramètres du contrôleur pour améliorer les performances du système.

CHAPITRE I

MODELISATION DES ROBOTS MOBILES

I.1. Introduction

La phase la plus importante de l'étude des robots consiste à définir la classe du robot en fonction des différentes actions à réaliser, du type de robot, ainsi que des différents éléments qui le constituent. Une fois cela fait, il sera possible de développer des algorithmes pour le contrôler.

Dans la première partie de ce chapitre, nous aborderons les différentes classes de robots, puis les différents blocs (capteurs, unité de calcul et actionneurs) qui le constituent. Dans la deuxième partie, des notions telles que l'holonomie et la non-holonomie ainsi que les équations cinématiques et dynamiques du robot mobile de type uni-cycle seront présentées.

I.2. Généralités sur la robotique mobiles

I.2.1. Classification des robots

La classification des robots peut se faire sur différents critères tels que la source d'alimentation utilisée, la géométrie de l'espace de travail, la taille du robot, système de locomotion, etc.

I.2.1.a. Classification des robots en fonction de la source d'alimentation:

Sur la base de la source d'alimentation, les robots peuvent être classés en cinq (5) divisions principales, à savoir: électrique, hydraulique, pneumatique, nucléaire et verte.

a) Source d'alimentation électrique: Les robots fonctionnant avec la source d'alimentation électrique peuvent en outre être subdivisés en systèmes à courant alternatif (CA) ou systèmes à courant continu (CC). Les systèmes à courant continu fournissent généralement un couple plus important, mais ils nécessitent souvent plus d'entretien pour les moteurs. L'utilisation de moteurs génère de la poussière et des étincelles qui peuvent créer des dangers pour le processus. Les systèmes à courant continu sont courants dans le monde de la robotique de loisir, car ces systèmes sont généralement des robots mobiles alimentés par batterie. Les robots alimentés en courant alternatif sont courants dans les industries et ils utilisent souvent des servomoteurs. Des moteurs pas à pas sont également utilisés pour ces systèmes.

b) Source d'énergie hydraulique: L'énergie hydraulique génère une grande quantité de force et elle est utilisée pour des charges lourdes en robotique. Le système utilise une

autre forme d'énergie pour générer une pression hydraulique. Le robot utilise cette force hydraulique pour effectuer ses tâches. Cependant, en raison des améliorations apportées aux servomoteurs, les robots hydrauliques perdent du terrain. Les robots hydrauliques présentent certains inconvénients tels qu'une fuite hydraulique, un risque d'incendie, une augmentation du bruit, une maintenance accrue et le coût de l'huile.

c) Source d'alimentation pneumatique: Les robots pneumatiques sont alimentés par de l'air comprimé ou des gaz inertes comprimés. Ceux-ci sont utilisés pour des capacités de transport à grande vitesse et à charge élevée. Ces systèmes sont très rapides et les industries les utilisent comme source de pression pneumatique bon marché. Cependant, le plus gros problème avec ces robots est la difficulté à maintenir leur position. Cela est dû au fait que le gaz est compressible et que son arrêt à mi-course entraîne une dérive. La seule façon de maintenir sa position est d'utiliser un arrêt dur et une pression constante. Les robots pneumatiques souffrent également du problème de bruit et des fuites.

d) Source d'énergie nucléaire : Les robots à propulsion nucléaire utilisaient leur propre réacteur nucléaire qui est plus petit que les réacteurs nucléaires des centrales nucléaires ou des sous-marins. Les robots à propulsion nucléaire sont utilisés par des agences spatiales telles que la NASA pour l'exploration de l'espace lointain. Les robots à propulsion nucléaire fonctionnent pendant des années et des décennies sans avoir besoin d'interaction humaine, ce qui les rend parfaitement adaptés aux missions spatiales. Cependant, si ces robots sont utilisés sur terre, il sera nécessaire d'éliminer correctement les matières nucléaires une fois le combustible complètement épuisé.

e) Source d'énergie verte: La source d'énergie verte fait référence à une grande variété de sources d'énergie qui ont en commun d'être facilement remplacées sans aucun impact écologique négatif. Les sources d'énergie verte potentielles pour alimenter les robots comprennent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les sources organiques, les sources de chaleur naturelles, etc.

I.2.1.b. Classification des robots basée sur la géométrie de l'espace de travail :

Sur la base de la géométrie de l'enveloppe de travail, les robots peuvent être classés en cartésiens, cylindriques, sphériques, articulés, SCARA et delta.

- Robot à géométrie cartésienne : c'est le type de robot le plus couramment utilisé dans les industries. Il est populaire car il est facile à utiliser et à programmer. Dans ce robot, la structure cinétique du bras est composée de trois articulations prismatiques mutuellement perpendiculaires. La position du poignet du robot peut être décrite en trois coordonnées

cartésiennes, à savoir. L'axe **X** pour se déplacer d'avant en arrière, l'axe **Y** pour se déplacer d'un côté à l'autre et l'axe **Z** pour se déplacer vers le haut ou vers le bas. Le mouvement linéaire des éléments cartésiens donne au robot un espace de travail rectangulaire ou en forme de cube. Les clients ont le choix de déterminer la vitesse, l'objectif de stock et les procédures de ces robots. Cependant, ces robots présentent l'inconvénient d'une complexité d'assemblage.

- Robot à géométrie cylindrique : il a une enveloppe de travail qui ressemble à un cylindre. Il a un axe rotatif sur la base pour faire tourner le robot, deux axes linéaires pour déplacer l'outil dans la zone de travail générale. Il a également 2 ou 3 axes mineurs pour l'orientation de l'outillage. Les robots à géométrie cylindrique sont parfaits pour atteindre les machines et ont une structure rigide requise pour les charges utiles importantes. L'installation de ces robots est facile car ils ne sont pas complexes et nécessitent un assemblage minimal.

- Robots à géométrie sphérique : si le premier ou le deuxième joint d'un robot cartésien est remplacé par un joint tournant, il est appelé robot cylindrique. L'enveloppe de travail de ce robot est une boule. La géométrie sphérique offre à l'utilisateur une large gamme d'options pour le positionnement du robot. Les robots sphériques ont une longue portée avec une taille plus petite par rapport aux robots cylindriques.

- Robots à géométrie articulée ont une enveloppe de travail de type sphérique qui est contrainte par la construction du robot.

I.2.1.c. Classification des robots selon le type de locomotion:

Le type de locomotion, soit à roues, à chenilles, marcheurs ou rampants, définit deux types de contraintes:

- Les contraintes cinématiques sont basées sur la géométrie de locomotion possible du robot dans le cadre de navigation.

- Les contraintes dynamiques sont liées aux facteurs influençant sur le mouvement exécuté et qui sont représentés par l'accélération, la vitesse bornée et la présence d'obstacle.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux robots mobiles à roues de type unicycle [27]. On distingue plusieurs types de robots mobiles à roues, classés principalement par la position et le nombre de roues utilisées. Nous citerons les quatre types de robots à roues couramment rencontrés.

I.2.1.1. Robot de type unicycle

Un robot de type unicycle est actionné par deux roues indépendantes. Il possède éventuellement des roues folles (libres) pour assurer sa stabilité mécanique. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices. En effet il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion: c'est un robot non-holonyme.

Il se déplace aisément d'un point à un autre par une suite de rotations simples et de lignes droites. La figure I.1 représente un robot mobile à roue de type unicycle, Pioneer 3DX.



Figure I.1 Robot mobile Pioneer 3DX

I.2.1.2. Robot de type tricycle

Un robot de type tricycle est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal (Fig. I.2). Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable. Il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion.

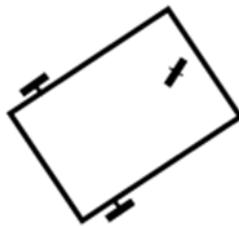


Figure I.2 Robot mobile tricycle.

I.2.1.3. Robot de type voiture

Un robot de type voiture est semblable au tricycle. Il est constitué de deux roues arrières fixes placées sur un même axe et de deux roues avant centrées orientables placées elles aussi sur un même axe (Fig. I.3) Le robot de type voiture est cependant plus stable puisqu'il possède un point d'appui supplémentaire. Toutes les autres propriétés du robot voiture sont identiques au robot tricycle, le premier pouvant être ramené au deuxième en remplaçant les deux roues avant par une

seule placée au centre de l'axe, et ceci de manière à laisser le centre de rotation inchangé.

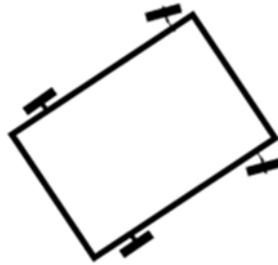


Figure I.3 Robot mobile de type voiture.

I.2.1.4. Robot omnidirectionnel

Un robot omnidirectionnel est un robot qui peut se déplacer librement dans toutes les directions. Il est en général constitué de trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral.



Figure I.4 Robot mobile de type omnidirectionnel.

I.2.2. L'ensemble des composantes d'un robot:

Un robot est un assemblage complexe de composants mécaniques et de composants électroniques. Les robots mobiles avec une source d'énergie embarquée (batterie d'accumulateurs électriques) sont dits autonomes. Le plus souvent les modules mécaniques et électroniques sont disposés comme suit:

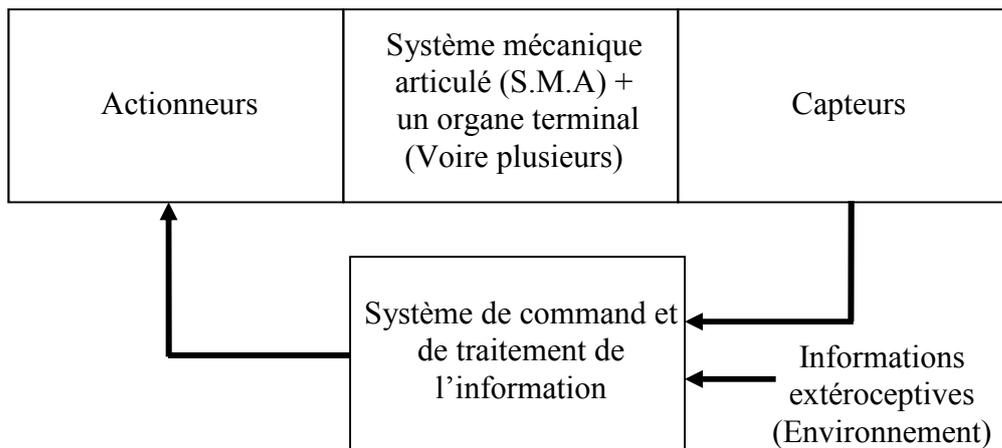


Figure I.5 : Schéma des éléments qui constituent un robot

1.2.2.1. Les Capteurs

Un capteur (ou organe de perception) est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

On distingue deux types de capteurs :

- Les capteurs proprioceptifs : qui fournissent l'information sur la configuration du manipulateur tel que la position, la vitesse, l'accélération, pour assurer au robot manipulateur le contrôle de sa structure mécanique articulée ; ils interviennent dans les boucles de régulation afin de permettre à l'unité de commande de prendre la décision adéquate.

Comme exemple, l'odomètre qui permet d'estimer le déplacement de la plateforme à partir de la mesure de rotation des roues (ou du déplacement des pattes). La mesure de rotation est en général effectuée par un codeur optique disposé sur l'axe de la roue, ou sur le système de transmission (par exemple sur la sortie de la boîte de vitesse pour une voiture).

On a aussi le télémètre, qui permet de mesurer la distance aux éléments de l'environnement, utilisant divers principes physiques.

- Les capteurs extéroceptifs : qui interviennent lorsque l'espace de travail est mal connu, afin de donner les informations sur l'environnement extérieur du robot comme la température, l'image etc. Ils permettent de modifier le comportement du robot pour s'adapter aux contraintes imposées.

I.2.2.2. Les Actionneurs

Les actionneurs sont des organes qui transforment l'énergie qui leur est fournie en un phénomène physique utilisable comme des mouvements. Si on se limite aux actionneurs pratiquement utilisables, il est possible de les classer comme suit :

- **Le type du mouvement généré** : Dans l'état actuel de la technologie, on trouve les actionneurs linéaires qui développent une force et génèrent un mouvement de translation parallèlement à cette force, et les actionneurs rotatifs qui développent un couple et génèrent un mouvement de rotation autour de l'axe du couple. Comme exemple, les moteurs électriques rotatifs sont fréquemment associés à des réducteurs mécaniques à engrenages.

- **La nature de la source d'énergie**: On dispose d'actionneurs pneumatiques qui utilisent l'air comprimé comme source d'énergie, d'actionneurs hydrauliques sous pression, et d'actionneurs électriques qui utilisent l'énergie électrique. La puissance massique et le pouvoir d'accélération sont des critères importants qui permettent une comparaison objective de ces différents types d'actionneurs.

Comme exemple, les vérins hydrauliques, reliés par une tuyauterie à des pompes, fournissent des pressions élevées.

I.2.3. L'Unité de traitement

Plus connue sous le nom de carte mère, il gère l'ensemble des tâches. Il admet trois rôles essentiels :

- le rôle de l'information, qui consiste à collecter l'information venant des capteurs.
- le rôle de la décision : en partant d'une tâche définie et en tenant compte des données du système et de l'environnement, il établit les actions adéquates.
- le rôle de la communication.

I.3. Modélisation

I.3.1. Introduction

La commande des robots consiste à établir un modèle mathématique. Les modèles utilisés lors de la commande sont: le modèle cinématique et le modèle dynamique. Il existe plusieurs types de robots mobiles à roues à savoir : les robots de type unicycle, les robots de type tricycle, et les robots de type voiture. Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons un robot de type unicycle à cause de sa simplicité de construction et de ses propriétés cinématiques intéressantes. Plusieurs robots ont fait l'objet d'étude de certains chercheurs, mais un a retenu leur attention: le robot mobile de type unicycle.

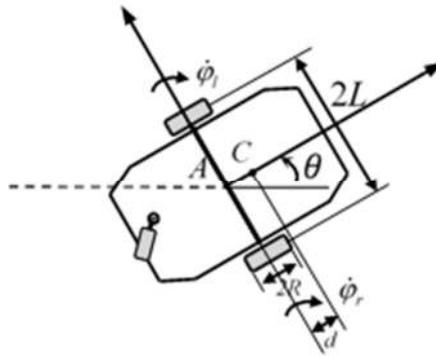


Figure I.6 Schéma d'un robot mobile de type unicycle

La figure I.6 représente les coordonnées du robot de type unicycle. On désigne par robot mobile de type unicycle, un robot actionné par deux roues indépendantes et possédant éventuellement un certain nombre de roues folles assurant son équilibre. Le robot de la figure I.6 possède une roue folle.

I.3.2. Modélisation Cinématique

Dans l'étude de la cinématique, seules les vitesses sont prises en compte. Le mouvement d'un robot mobile à conduite différentielle est caractérisé par des contraintes cinématiques.

I.3.2.1. Systèmes de coordonnées

Notons $\{X_l, Y_l\}$ un repère fixe quelconque et $\{X_r, Y_r\}$ un repère mobile lié au robot. Soient $q^l = [x^l, y^l, \theta^l]^T$ un point du repère $\{X_l, Y_l\}$ et $q^r = [x^r, y^r, \theta^r]^T$ un point du repère $\{X_r, Y_r\}$.

Les points q^l et q^r sont liés par la matrice orthogonale $R(\theta)$.

$$q^l = R(\theta)q^r \text{ avec } R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I.1})$$

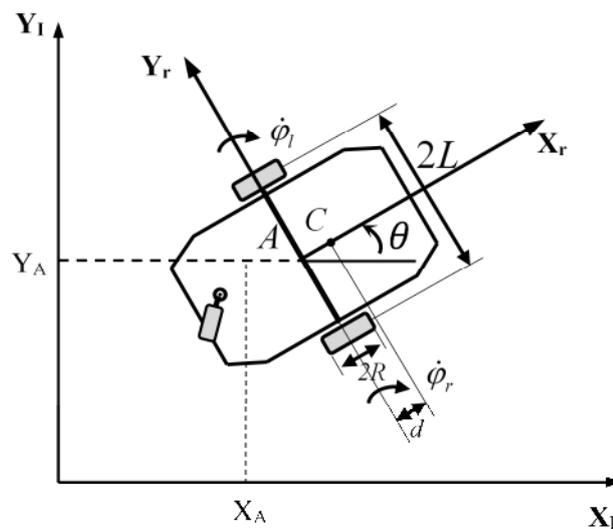


Figure I.7: Robot mobile dans le repère fixe

La figure I.7 présente le robot mobile de type unicycle dans les repères fixe et mobile.

A : est le point milieu de l'axe des roues.

$2R$: représente le diamètre de la roue du robot ;

$2L$: représente la largeur du robot ;

$\dot{\phi}_r$ et $\dot{\phi}_l$: représentent respectivement les vitesses de rotation de la roue droite et de la roue gauche ;

θ : est l'angle d'orientation du robot ;

d : est la distance entre le point A et le point C.

I.3.2.2. Modélisation des contraintes cinématiques:

Le mouvement du robot est caractérisé par deux contraintes non-holonomes qui sont obtenues par deux hypothèses [28]. Une contrainte non holonome est une contrainte non intégrable faisant intervenir la dérivée par rapport au temps des coordonnées du robot. Si le robot peut instantanément se déplacer en avant ou en arrière mais il ne peut pas se déplacer à droite et à gauche sans que les roues glissent, on dit qu'il possède une contrainte non holonome à savoir :

- Aucun glissement latéral ;
- Roulement sans glissement.

Par contre si chaque roue est capable de se déplacer en avant et de côté, on dit qu'il s'agit d'un comportement holonome du robot.

I.3.2.3. Hypothèse 1.

Aucun glissement latéral: Cette contrainte signifie simplement que le robot peut se déplacer uniquement en avant et en arrière, mais pas latéralement. Cela signifie que la vitesse du robot

associée au point A est nulle le long de l'axe latéral dans le repère mobile, soit $\dot{y}_A^r = 0$.

En utilisant la matrice de rotation $R(\theta)$, l'expression de la vitesse du robot associée au point A dans le repère fixe est :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A^l \\ \dot{y}_A^l \\ \dot{\theta}_A^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_A^r \\ 0 \\ \dot{\theta}_A^r \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_A^l = \dot{x}_A^r \cdot \cos \theta \\ \dot{y}_A^l = \dot{x}_A^r \cdot \sin \theta \end{cases}$$

Ainsi on obtient :

$$-\dot{x}_A^l \cdot \sin \theta + \dot{y}_A^l \cos \theta = 0 \quad (I.2)$$

I.3.2.4. Hypothèse 2.

Roulement sans glissement: La contrainte de roulement sans glissement représente le fait que chaque roue maintient un point en contact avec le sol comme indiqué dans la figure I.8. Les hypothèses 1 et 2 ont été développées dans [28].

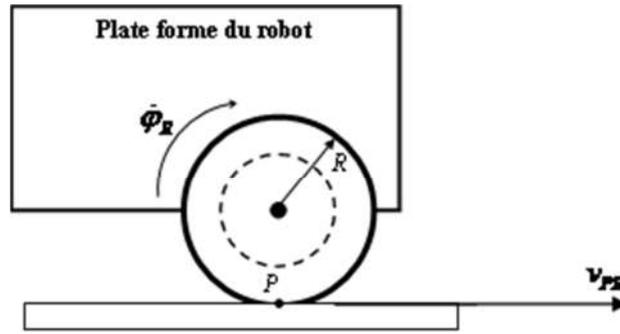


Figure I.8 Caractérisation du roulement sans glissement

Ainsi la vitesse linéaire de chaque roue du robot au point de contact P est donnée par:

$$\begin{cases} v_{PL} = R\dot{\phi}_L \\ v_{PR} = R\dot{\phi}_R \end{cases}$$

où v_{PL} est la vitesse linéaire de la roue gauche, et v_{PR} est la vitesse linéaire de la roue droite.

I.3.2.5. Modèle cinématique du robot mobile unicycle

Les expressions des positions généralisées et des vitesses généralisées dans le repère fixe en fonction des coordonnées du point A sont données par :

$$\text{Roue droite : } \begin{cases} x_{PR}^l = x_A^l + L \sin \theta \\ y_{PR}^l = y_A^l - L \cos \theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{PR}^l = \dot{x}_A^l + L\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_{PR}^l = \dot{y}_A^l + L\dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (I.3)$$

$$\text{Roue gauche : } \begin{cases} x_{PL}^I = x_A^I - L \sin \theta \\ y_{PL}^I = y_A^I + L \cos \theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{PL}^I = \dot{x}_A^I - L \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_{PL}^I = \dot{y}_A^I - L \dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

En utilisant la matrice de rotation $R(\theta)$ et en l'appliquant à la roue droite on obtient:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^I \\ \dot{y}_{PR}^I \\ \dot{\theta}^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^r \\ \dot{y}_{PR}^r \\ \dot{\theta}^r \end{pmatrix} \quad (\text{I.5})$$

avec $\dot{y}_{PR}^r = 0$ signifie que la vitesse au point P de la roue droite est nulle (car aucun glissement latéral). Ainsi,

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^I \\ \dot{y}_{PR}^I \\ \dot{\theta}^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^r \cos \theta \\ \dot{x}_{PR}^r \sin \theta \\ \dot{\theta}^r \end{pmatrix} \quad (\text{I.6})$$

$$\text{Où : } \vec{v}_{PR}^r = \dot{x}_{PR}^r \vec{i}^r + \dot{y}_{PR}^r \vec{j}^r = R \dot{\phi}_r \vec{i}^r \Rightarrow v_{PR}^r = \dot{x}_{PR}^r = R \dot{\phi}_R$$

L'équation (I.6) devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_{PR}^I \cos \theta = \dot{x}_{PR}^r \cos^2 \theta & (\text{a}) \\ \dot{y}_{PR}^I \sin \theta = \dot{x}_{PR}^r \sin^2 \theta & (\text{b}) \end{cases}$$

En sommant (a) et (b), on obtient:

$$\dot{x}_{PR}^I \cos \theta + \dot{y}_{PR}^I \sin \theta = R \dot{\phi}_R \quad (\text{I.7})$$

De même pour la roue gauche.

$$\dot{x}_{PL}^I \cos \theta + \dot{y}_{PL}^I \sin \theta = R \dot{\phi}_L \quad (\text{I.8})$$

On peut former le système d'équation des deux roues

$$\begin{cases} \dot{x}_{PR}^I \cos \theta + \dot{y}_{PR}^I \sin \theta = R \dot{\phi}_R \\ \dot{x}_{PL}^I \cos \theta + \dot{y}_{PL}^I \sin \theta = R \dot{\phi}_L \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

En introduisant les équations (I.3) et (I.4) dans (I.9) on obtient :

$$\begin{cases} (\dot{x}_A^I + L \dot{\theta} \cos \theta) \cos \theta + (\dot{y}_A^I + L \dot{\theta} \sin \theta) \sin \theta = R \dot{\phi}_R \\ (\dot{x}_A^I - L \dot{\theta} \cos \theta) \cos \theta + (\dot{y}_A^I - L \dot{\theta} \sin \theta) \sin \theta = R \dot{\phi}_L \end{cases}$$

Les hypothèses 1, 2 et les équations précédentes produisent les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} -\dot{x}'_A \sin \theta + \dot{y}'_A \cos \theta = 0 \\ \dot{x}'_A \cos \theta + \dot{y}'_A \sin \theta + L\dot{\theta} = R\dot{\phi}_R \\ \dot{x}'_A \cos \theta + \dot{y}'_A \sin \theta - L\dot{\theta} = R\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

De l'équation (I.10) on peut écrire:

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (\text{I.11})$$

$A(q)$ est la matrice de contraintes non-holonomes donnée par:

$$A(q) = \begin{pmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & L & -R & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -L & 0 & -R \end{pmatrix}$$

\dot{q} représente la dérivé de la coordonnée généralisée q , donnée par :

$$\dot{q} = [\dot{x}_A, \dot{y}_A, \dot{\theta}, \dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L]^T$$

L'équation (I.10) nous permet d'obtenir l'expression des vitesses linéaires des roues droite et gauche au point de contact P

$$\begin{cases} v_{PR} = v_A + L\dot{\theta} \\ v_{PL} = v_A - L\dot{\theta} \end{cases}$$

avec v_A la vitesse du point A , v_{PR} est la vitesse de la roue droite au point P et v_{PL} est la vitesse de la roue gauche au point P .

En posant:

$$\begin{cases} v = v_A \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \text{ et } \begin{cases} v_{PR} = v_R \\ v_{PL} = v_L \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

On obtient l'expression de la vitesse linéaire v et la vitesse angulaire ω du robot mobile en fonction des vitesses de rotation de la roue gauche $\dot{\phi}_L$ et de la roue droite $\dot{\phi}_R$

$$\begin{cases} v = \frac{(v_R + v_L)}{2} = \frac{R(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \\ \omega = \frac{(v_R - v_L)}{2L} = \frac{R(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2L} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Dans le repère mobile les coordonnées du point A sont :

$$\begin{cases} \dot{x}_A = v = \frac{R(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}{2} \\ \dot{y}_A^r = 0 \\ \dot{\theta}_A^r = \omega = \frac{R(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}{2L} \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

En se servant de l'équation (I.1), on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A^l \\ \dot{y}_A^l \\ \dot{\theta}_A^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_A^r \\ \dot{y}_A^r \\ \dot{\theta}_A^r \end{pmatrix} \quad (\text{I.14a})$$

En remplaçant l'équation (I.13) dans (I.14), on obtient:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A^l \\ \dot{y}_A^l \\ \dot{\theta}_A^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{R(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}{2} \\ 0 \\ \frac{R(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}{2L} \end{pmatrix} \quad (\text{I.14.b})$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A^l \\ \dot{y}_A^l \\ \dot{\theta}_A^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{pmatrix} \quad (\text{I.15})$$

En combinant les équations (I.13) et (I.15), soit encore à partir de l'équation (I.14b), on obtient le modèle cinématique du robot mobile unicycle :

$$\dot{q}_A^l = \begin{pmatrix} \dot{x}_A^l \\ \dot{y}_A^l \\ \dot{\theta}_A^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (\text{I.16})$$

I.3.3. Modélisation dynamique

Le modèle dynamique est nécessaire pour la simulation, l'analyse du mouvement du robot et la conception des variétés d'algorithmes de commande. Plusieurs formalismes tels que: le formalisme d'Euler-Lagrange, le formalisme de Newton-Euler et le principe de D'Alembert permettent de faire la modélisation dynamique du robot. Dans notre cas, on s'intéressera uniquement au formalisme d'Euler-Lagrange.

Considérons un robot non-holonome avec n coordonnées généralisées (q_1, q_2, \dots, q_n) et

soumis à m contraintes.

Le formalisme d'Euler-Lagrange est décrit par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = F + A^T(q) \cdot \lambda_k \quad (\text{I.17})$$

Avec $L(q, \dot{q}) = T - V$: le Lagrangien

T : L'énergie cinétique du système ;

V : L'énergie potentielle du système ;

F : Le vecteur de force généralisée ;

λ_k : Le vecteur des multiplicateurs de Lagrange ;

q_i : La coordonnée généralisée et $q = [x_A, y_A, \theta_A, \varphi_R, \varphi_L]^T$, de dimension $n = 5$.

L'énergie cinétique T du système est donnée par :

$$T = T_C + T_{\omega R} + T_{\omega L} \quad (\text{I.18})$$

Où T_C est l'énergie cinétique de la plate-forme ;

$$T_C = \frac{1}{2} m_C v_C^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\theta}^2 \quad (\text{I.19})$$

$T_{\omega R}$ est l'énergie cinétique de la roue droite;

$$T_{\omega R} = \frac{1}{2} m_{\omega} v_{\omega R}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{\omega} \dot{\varphi}_R^2 \quad (\text{I.20})$$

$T_{\omega L}$ est l'énergie cinétique de la roue gauche.

$$T_{\omega L} = \frac{1}{2} m_{\omega} v_{\omega L}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{\omega} \dot{\varphi}_L^2 \quad (\text{I.21})$$

Avec :

m_C : La masse de la plate-forme.

m_{ω} : La masse de chaque roue plus la masse du moteur.

$v_{\omega R}$: La vitesse linéaire de la roue droite.

$v_{\omega L}$: La vitesse linéaire de la roue gauche.

l_m : Le moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport au diamètre de la roue.

l_ω : Le moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport à l'axe de la roue.

l_C : Le moment d'inertie de la plate-forme du robot sans les roues, les moteurs, autour de l'axe vertical qui passe par le point C .

Le point C dans le repère fixe a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x_C = x_A + d \cdot \cos \theta \\ y_C = y_A + d \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (I.22)$$

L'énergie cinétique totale est donnée par :

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x}_A^2 + \dot{y}_A^2) - m_C \cdot d \cdot \dot{\theta} (\dot{y}_A \cos \theta - \dot{x}_A \sin \theta) + \frac{1}{2} l_\omega (\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2) + \frac{1}{2} l \dot{\theta}^2 \quad (I.23)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} m = m_C + 2m_\omega \\ l = l_C + m_C \cdot d^2 + 2m_\omega L^2 + 2l_m \end{cases} \quad (I.24)$$

L'énergie potentielle étant nulle car le robot se déplace sur un plan horizontal.

Alors on a donc le Lagrangien : $L = T$

En se servant de l'équation (I.23), l'équation (I.17) devient:

$$\begin{cases} m \ddot{x}_A - m d \ddot{\theta} \sin \theta - m d \dot{\theta}^2 \cos \theta = C_1 \\ m \ddot{y}_A - m d \ddot{\theta} \cos \theta - m d \dot{\theta}^2 \sin \theta = C_2 \\ -m d \ddot{x}_A \sin \theta + m d \ddot{y}_A \cos \theta + l \ddot{\theta} = C_3 \\ l_\omega \ddot{\phi}_R = \tau_R + C_4 \\ l_\omega \ddot{\phi}_L = \tau_L + C_5 \end{cases} \quad (I.25)$$

Avec : C_1, C_2, C_3, C_4 et C_5 sont les coefficients relatifs aux contraintes cinématiques qui peuvent être exprimés en fonction du vecteur de multiplicateurs de Lagrange et de la matrice de contrainte cinématique $A^T(q)$ où :

$$A^T(q) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5]^T$$

Le modèle dynamique du robot mobile à roue peut se mettre sous la forme:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)u - A^T(q)\lambda \quad (I.26)$$

Avec :

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 & -md \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \cos \theta & 0 & 0 \\ -md \sin \theta & md \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{pmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 & md \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B(q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A^T(q) \cdot \lambda = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix}$$

$M(q)$: est la matrice d'inertie symétrique définie positive de taille $n \times n$;

$V(q, \dot{q})$: est la matrice des forces centrifuges et des forces de Coriolis;

$B(q)$: est la matrice de transformation d'entrée;

$A(q)$: est la matrice des contraintes non-holonomes;

u : est le vecteur d'entrée, $u = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}$.

Il est possible d'obtenir l'expression du modèle dynamique du robot en éliminant le terme $AT(q) \cdot \lambda$ qui correspond aux forces de contraintes liées aux contraintes cinématiques.

En définissant $\eta = \begin{pmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix}$ comme étant le vecteur de vitesses auxiliaires, on peut écrire que (en utilisant I.15) :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_A \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R/2) \cos \theta & (R/2) \cos \theta \\ (R/2) \sin \theta & (R/2) \sin \theta \\ R/2L & -R/2L \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{q} = S(q)\eta \quad (I.27.a)$$

et

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \quad (\text{I.27.b})$$

$S(q)$ est une matrice de rang complet qui satisfait à la condition suivante :

$$S^T(q)A^T(q) = 0 \quad (\text{I.28})$$

En remplaçant (I.27) dans (I.26), on obtient :

$$M(q)[\dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta}] + V(q, \dot{q})S(q)\eta = B(q)u - A^T(q) \cdot \lambda \quad (\text{I.29})$$

En multipliant l'équation (I.29) par $S^T(q)$, on a:

$$S^T(q)M(q)\dot{S}(q)\eta + S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)V(q, \dot{q})S(q)\eta = S^T(q)B(q)u - S^T(q)A^T(q) \cdot \lambda$$

En posant:

$$\begin{cases} \bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q) \\ \bar{V}(q, \dot{q}) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, \dot{q})S(q) \\ \bar{B}(q) = S^T(q)B(q) \end{cases} \quad (\text{I.30})$$

L'équation (I.29) sous la forme réduite est :

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)u \quad (\text{I.31})$$

Avec :

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) & I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L^2}(m_c d \dot{\theta}) \\ -\frac{R^2}{2L^2}(m_c d \dot{\theta}) & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En insérant (I.13) dans (2.31) on obtient:

$$\begin{bmatrix} (m + \frac{2I_w}{R^2}) & 0 \\ 0 & (I + \frac{2L^2}{R^2}I_w) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -m_c d \omega \\ m_c d \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.32})$$

$$\text{avec } u = \begin{cases} u_1 = \tau_R + \tau_L \\ u_2 = \tau_R - \tau_L \end{cases}$$

où :

τ_R et τ_L : est le couple d'entrée exprimé en Newton mètres (N.m).

L'expression linéarisée de l'équation (I.32) est:

$$\begin{bmatrix} (m + \frac{2I_w}{R^2}) & 0 \\ 0 & (I + \frac{2L^2}{R^2} I_w) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.33})$$

Où :

m : est la masse totale du robot ;

I : est l'inertie totale équivalente du système;

R : est le rayon de la roue ;

$2L$: est la largeur du robot.

En remplaçant $(m + \frac{2I_w}{R^2})$ par m_0 et $(I + \frac{2L^2}{R^2} I_w)$ par I_0 , on obtient une expression simplifiée de l'équation (I.33) donnée par:

$$\begin{bmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.34})$$

I.4. Conclusion

Les constituants et la modélisation du robot mobile ont été présentés dans ce chapitre. Nous avons également développé des équations cinématiques et dynamiques du robot mobile unicycle. Dans les commandes cinématique et dynamique où l'on veut contrôler la vitesse lors des déplacements, et même avoir des accélérations importantes, le modèle géométrique n'est plus valable pour la commande. On est obligé d'avoir recours aux modèles cinématique et dynamique, qui font intervenir les masses, les forces d'inertie. Le modèle dynamique, tout comme le modèle cinématique sont deux modèles essentiels sur lesquels est basée la commande. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les notions de systèmes non linéaires, de stabilité et de commandes non linéaires en se servant des modèles dynamiques linéaire et non linéaire.

CHAPITRE II

PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE DES SYSTEMES ROBOTIQUES NON HOLONOMES

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à étudier les techniques développées pour assurer des mouvements sûrs, robustes et précis pour un système robotique. Plusieurs axes de recherche ont été investigués. Ils s'articulent autour de deux techniques complémentaires : la planification et la commande des mouvements.

Le problème de la génération de trajectoire est de calculer pour le système de commande les variables de référence en fonction du temps de telle sorte que le robot se déplace d'une manière sécurisée. Ainsi, une trajectoire fait référence à un chemin et à une histoire temporelle le long du chemin [1]. Selon les contraintes imposées par l'environnement ou le robot, il peut y avoir plusieurs chemins qui mènent à cette position finale. La décision de concevoir cette trajectoire est appelée planification de trajectoire. Il existe plusieurs techniques de planification de trajectoire des robots, et ce sont l'environnement et la structure du robot qui vont déterminer laquelle des méthodes de planification présentées à ce chapitre est la plus adaptée au cas qui nous intéresse.

II.2. Planification du mouvement

En robotique, on appelle planification de mouvement le problème particulier de calcul préalable du mouvement à accomplir. C'est un problème fondamental en robotique qui a fait et continu de faire l'objet de nombreux travaux de recherche depuis la fin des années 60.

Dans sa forme la plus générale, la planification de mouvement se définit de la façon suivante : étant donné un modèle du système robotique et de son environnement, planifier un mouvement consiste à calculer le mouvement que doit exécuter le système robotique pour atteindre un objectif fixé a priori. Dans sa version de base, communément appelée planification de chemin, on se limite à l'aspect géométrique du problème: on dispose du modèle géométrique du système robotique (supposé libre dans ses mouvements), et des objets de l'environnement ou de l'espace de travail (supposés fixes), puis on calcule un chemin géométrique, c.à.d. une séquence continue de configurations, sans collision entre deux configurations données. Après, on souhaite de calculer le déplacement du robot. La liberté de mouvement, tant en translation qu'en rotation, est en général assurée par la conception mécanique du robot.

Il suffit cependant que l'un des deux postulats de la planification de chemin soit violé (liberté de mouvement du robot, nature statique de l'environnement), et la planification de chemin tant qu'elle n'est plus sûr. Selon les cas, il faudra alors calculer un chemin et un profil de vitesse associé (ou de façon équivalente une chronique temporelle), une trajectoire, c.à.d. une séquence continue d'états voire une stratégie de déplacement pouvant combiner des actions motrices, des actions perceptives ou des actions sensorimotrices.

II.2.1. Définition du chemin

La planification de chemin met l'accent sur les caractéristiques géométriques de la planification des mouvements formulées dans l'espace des configurations du système robotique considéré, le robot est représenté par un point dans cet espace, et tout problème de planification de chemin conduit à un problème de calcul d'une courbe relativement continue dans cet espace. Cette courbe doit relier deux configurations données et ne doit contenir aucune configuration susceptible de provoquer une collision entre le système de robot et l'une des obstacles fixes de l'environnement. Chaque chemin qui assure l'évitement des collisions est une solution possible. Pour certaine classe des planificateurs, l'objectif principal de la planification de chemin est de déterminer le chemin le plus optimal, selon un critère bien défini, entre la configuration de départ et la configuration finale. La planification de chemin doit porter aussi sur la prise en compte de ce que l'on appelle des contraintes cinématiques et géométrique.

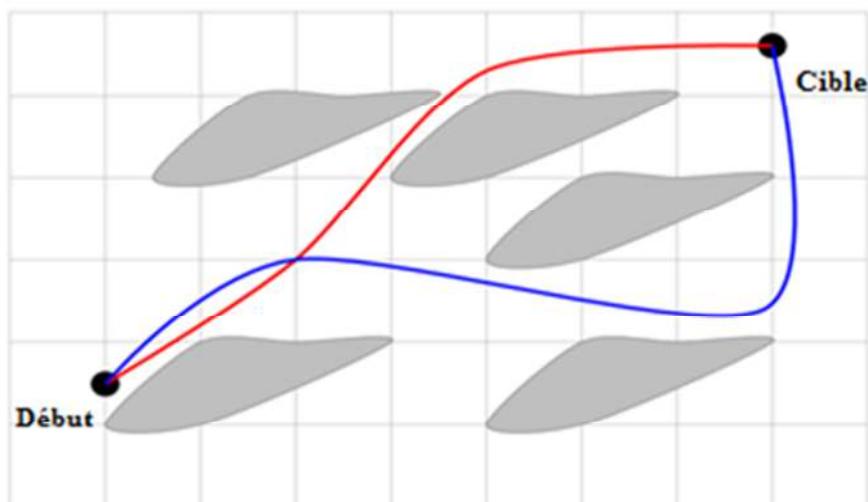


Figure II.1 Chemin lisse dans le plan

II.2.2. Définition de trajectoire

C'est la dimension temporelle qui constitue la différence essentielle entre un chemin et une trajectoire. Une trajectoire c'est l'historique temporel de la position, de la vitesse et de l'accélération pour chaque degré de liberté. La planification de trajectoire s'impose donc dès lors que l'on doive prendre en compte des contraintes dynamiques, c.à.d. dépendantes du temps [29].

Le vecteur des trajectoires représente généralement le signal de référence dans la boucle de commande et d'asservissement.

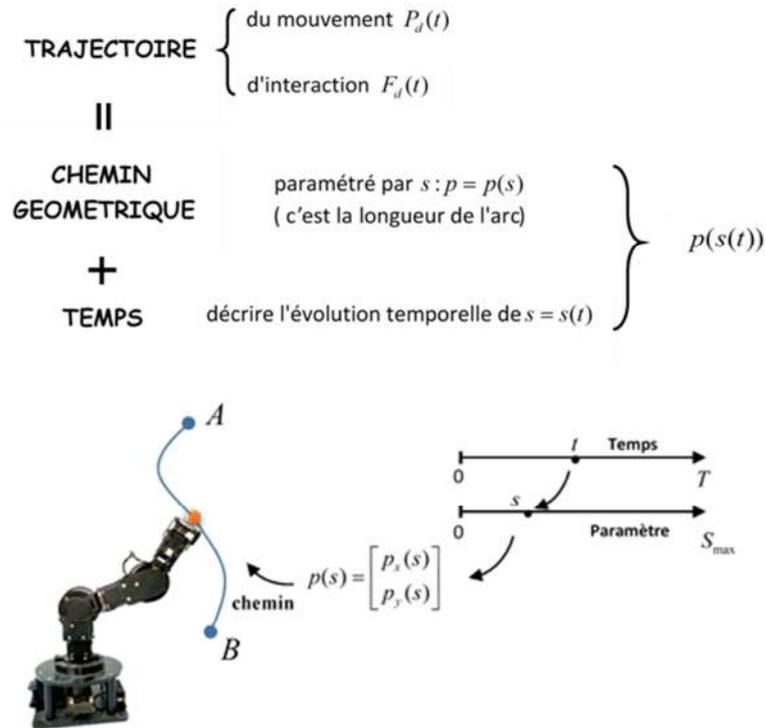


Figure II.2 Schéma illustratif de la planification de trajectoire

La plupart des travaux de planification de trajectoire sont basés sur le concept d'espace des configurations du robot introduit dans [30] au début des années 80. Une configuration désigne l'ensemble des paramètres caractérisant d'une manière unique le robot dans son environnement. L'ensemble des configurations du robot est l'espace des configurations Q , qui a une structure de variété différentielle. On note n la dimension de Q . Une trajectoire est une fonction continue de $[t_{initial}, t_{final}]$ dans Q qui à toute valeur $t \in [t_{initial}, t_{final}]$ associe une configuration :

$$q : [t_{initial}, t_{final}] \rightarrow Q$$

$$t \mapsto q(t)$$

Une trajectoire est dite admissible si elle est solution du système d'équations différentielles correspondant au modèle cinématique du robot, incluant les contraintes sur les commandes, pour des conditions initiales et finales données. Un chemin est l'image d'une trajectoire dans Q . Un chemin admissible est l'image d'une trajectoire admissible [31].

II.3. Contraintes de planification

En plus des spécifications liées à la tâche considérée, le module de planification des mouvements doit prendre en compte aussi les différentes limites physiques liées au système robotique et à sa structure. On parle ici sur les contraintes dites cinématiques et dynamiques qui

limitent la faisabilité de certaines classes des trajectoires générées.

II.3.1. Contraintes cinématiques différentielles

Typiquement, les contraintes cinématiques du robot limitent le nombre de trajets pouvant être effectués entre deux positions (pour certains mobiles par exemple, la rotation est toujours dépendante du déplacement). La cinématique du robot ne permet pas de suivre une trajectoire spécifique. Cela est dû au fait qu'il y a moins de variables utilisées pour définir les configurations mobiles que de degrés de liberté. Un tel système est non-holonyme, et le terme "configuration" désigne la position et l'orientation du robot mobile par rapport à l'environnement (deux ou trois coordonnées lorsque le robot se déplace dans l'espace ou dans un plan) (un ou trois angles). Ce type de robot est incapable de transporter tous les types de trajectoires possibles. C'est le cas d'un véhicule automobile forcé d'exécuter un créneau pour ce garé. En plus de la non-holonomie, le robot est également soumis à une restriction supplémentaire : la trajectoire doit avoir un rayon de courbure minimum. Cela est dû au fait que certains robots ne peuvent pas tourner sur place ou qu'un changement brusque de vitesse pour compléter un mince arc de cercle serait préjudiciable à la mécanique et à la précision du mouvement [32].

Regardons une illustration directe de ce qu'implique le problème des non-holonomies. Considérant le "unicycle", ou le système robotique qui est réduit à une roue qui se déplace sur une surface. Une configuration de ce système est l'orientation de la roue θ et les coordonnées (x, y) du point de contact R entre elle et le sol : $q = (x, y, \theta)$. L'exigence de rotation sans glissement oblige R à se déplacer dans une direction perpendiculaire à l'axe de la roue, qui est représentée par la relation suivante :

$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0 \quad (\text{II.1})$$

La relation (II.1) est ce que l'on appelle une "contrainte cinématique non holonyme", ou une relation qui dépend à la fois des paramètres de configuration du système et de leurs valeurs dérivées. Ce type de conflit survient généralement lorsqu'un système a moins de paramètres de configuration que de paramètres de commande. C'est le cas de la roue qui possède deux paramètres de commande (la vitesse linéaire v et la vitesse angulaire w) et trois paramètres de configuration $(x, y \text{ et } \theta)$.

Du point de vue de la planification des chemins, le principal effet des non-holonomies est qu'elles forcent le calcul de chemins à la fois sans collision et admissibles, c'est-à-dire des chemins qui vérifient les contraintes non holonomes du système considéré. La difficulté supplémentaire apportée par la non-holonomie a amené certains membres de la communauté à ignorer les difficultés et à se concentrer d'abord sur le problème du calcul du chemin admissible.

L'apport d'outils issus de la géométrie différentielle et de la commande de systèmes non linéaires a été crucial dans ce domaine pour comprendre les problèmes et développer des solutions [33] [34].

Sous la rubrique générale de la planification sous contraintes différentielles, de nombreuses catégories importantes de problèmes ont fait l'objet d'une attention considérable dans la littérature scientifique :

- Les contraintes sur l'organe terminal dans l'espace Cartésien : pour les bras manipulateurs à chaînes ouverte ou fermée.
- Les contraintes non-holonomes : pour les robots mobiles.
- Les contraintes kinodynamique : le problème de planification sous des contraintes sur les vitesses et les accélérations s'appelle un problème de planification "KinoDynamic" [7].

II.3.2. Contraintes dynamiques

L'émergence de contraintes dynamiques dans le domaine de la planification des mouvements remonte au milieu des années 1980. Les deux types de contraintes dynamiques, celles relatives à l'environnement (la présence d'appareils mobiles) et celles relatives au système robotique (sa dynamique au sens mécanique du terme) sont traitées en grande partie séparément lorsque nous commençons à discuter de cette question au début des années 1990.

En termes d'appareils mobiles, la notion clé est le concept de l'espace configurations-temps introduit pour la première fois par [35]. Les contraintes dynamiques de non-collision imposées par les dispositifs mobiles peuvent être converties en régions statiquement interdites de l'espace des configurations-temps par l'ajout de la dimension temporelle. De ce fait, grâce à une technique appelée planification de chemin, il est désormais possible de planifier une trajectoire, ou une courbe dans l'espace des configurations-temps. Il suffit d'adapter cette stratégie pour tenir compte des limites de la dimension temporelle, à savoir qu'on ne peut pas aller trop vite ou dans le passé (vitesse maximale). En conséquence, plusieurs auteurs ont proposé des modifications du graphe de visibilité, ex. [[36], [37], [35], [38]], ou même des techniques de décomposition cellulaire à base de cellules ex. [39],[40].

L'espace des états est sans aucun doute l'idée clé en ce qui concerne la dynamique du système robotique. Bien que certains auteurs aient proposé des méthodes de planification de trajectoire opérant dans l'espace des configurations, comme [41], ou dans l'espace de travail, comme [42], le cadre privilégié pour aborder le problème de la planification de trajectoire en tenant compte de la dynamique du système robotique considéré est l'espace des états ex. [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], etc. Les cas abordés et les modèles dynamiques utilisés dans ces nombreux travaux sont de complexité variable (robot ponctuel ou non, espace de travail à une, deux ou trois

dimensions, accélération portée, dynamique retardée, etc.).

La planification de trajectoire en présence de contraintes dynamiques a été de proposer en 1993 [50] un cadre général pour traiter ce type de problème. Ce cadre, qui résulte naturellement de la combinaison des cadres de traitement du problème mobile et du problème du système dynamique, est l'espace des états-temps, ou l'espace des états du système robotique auquel s'ajoute la dimension temporelle. Aux fins de la planification d'itinéraire, l'espace d'état joue un rôle similaire à celui de l'espace de configuration. Il permet d'abord une modélisation cohérente d'un sous-ensemble de contraintes dynamiques [31].

II.4. Un état de l'art sur les techniques de planification

Cette section met l'accent sur les différentes techniques proposées dans la littérature pour résoudre les problèmes de planifications d'un système robotique.

II.4.1. Planification du chemin

Pour résoudre le problème d'évitement d'obstacles, différentes techniques ont été développées telles que, les méthodes de décomposition cellulaire [51][52][53], les champs potentiels [54] et les méthodes de construction des graphes [55]. Ces approches, dites classiques, représentent les premiers pas dans le but d'autonomiser le fonctionnement des robots. Elles ne considèrent que les tâches d'assurer des mouvements sans collisions. La notion de complétude différencie ces approches. On distingue des planificateurs complets, des planificateurs complets en résolution et des planificateurs de complétude probabiliste.

En plus des approches mentionnées précédemment, il est important de noter les techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, etc. qui ont connu un succès significatif dans l'espace de planification, que ce soit pour améliorer l'efficacité des approches traditionnelles ou créer de tout nouveaux algorithmes de mouvement. Pour un bref aperçu, voir [55].

Pour que le robot fonctionne efficacement, un problème de reconstruction et de sélection des solutions les plus sophistiquées doit être abordé comme une deuxième étape de planification des chemins. En fonction des données obtenues par l'un des algorithmes de planification classiques ou basés sur des techniques d'intelligence artificiel, la sélection se fait soit en ligne, soit hors ligne. La conception et la réalisation assistées par ordinateur (CAGD, Computer Aided Geometric Design) permettent de définir et de manipuler des courbes continues dans l'espace cartésien, que ce soit en 2D ou en 3D. Ces courbes sont le plus souvent décrites comme des formes paramétrées utilisant des fonctions polynomiales ou rationnelles :

$$\begin{cases} P(u) = [x(u) y(u) z(u)]^T \\ P(u_{\min}) = X_i, P(u_{\max}) = X_f \\ \forall \eta \in u : P(\eta) \in C_{\text{free}}, g(q, \dot{q}) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

d'où : $u \in [u_{\min}, u_{\max}]$ est un paramètre quelconque, P est une fonction choisie telle que

$$\left\| \vec{P}' \right\| = \left\| \frac{dP}{du} \right\| \neq 0 \quad \forall u .$$

La troisième égalité dans l'équation (II.2) est ajoutée pour s'assurer que le mouvement du robot respecte les contraintes géométriques ou cinématiques.

Etant donné une représentation convenable d'un système robotisé et une carte de l'environnement dans lequel il évolue, le problème de planification à ce stage est typiquement reformulé comme un problème d'optimisation, qui consiste à définir la forme paramétrique dans l'équation II.2 qui minimise un critère de performance bien défini tels que la longueur, la courbure [56] ou la sécurité du chemin parcouru [57]. Le chemin doit être défini à base des fonctions définies par morceaux pour assurer le passage par (ou à proximité) un ensemble de point convenablement présélectionnés.

Ce problème de planification (II.2) dispose de plusieurs degrés de liberté pour résoudre différentes tâches avec différentes contraintes de mouvement par le choix du paramètre d'interpolation u et de la fonction $P(u)$ ou le choix d'ensemble de point de passage.

Plusieurs algorithmes ont été proposés dans la littérature pour résoudre le problème de définitions de la fonction P . Ces algorithmes peuvent être principalement classifiés en trois catégories, fonctions d'interpolations tels que les splines cubique, les états-splines, fonctions d'approximation, tels que les courbe de Béziérs et les B-splines et des fonctions basée sur manœuvres spécifiques, tels que les segments linéaires, circulaires et colloïdes, ...etc. Le caractère lisse qui représente le degré de continuité de la route générée différencie entre ces techniques. Ce caractère est évalué pratiquement soit en considérant la continuité paramétrique ou géométrique[58].

Concernant le choix du paramètre u , nous ne supposons également qu'une autre paramétrisation, $s(u)$, résultant de l'inversion de l'équation (II.3), quelle que soit la nature du paramètre u , se produira. Il en résulte ce que l'on appelle une paramétrisation en fonction de la longueur d'arc s (arc length parameterization) définie comme :

$$s(u) = \int_{u_0}^u \vec{P}'(u) du \quad (\text{II.3})$$

d'où $u \geq u_0$. Ce choix permet de garantir que :

$$\begin{cases} s(u) \geq s(u_0) \\ \|\vec{P}'(s)\| = 1 \end{cases}$$

Cette décision facilite également la modélisation du mouvement et du profil du robot tout au long du parcours comme l'indique [7] et [59]. Lors de la discussion d'une courbe avec une paramétrisation régulière arbitraire, nous nous référerons à $P(u)$, et lors de la discussion d'une courbe avec une paramétrisation dépendant de la longueur de l'arc s , nous nous référerons à $P(s)$.

Afin de résoudre le problème inverse (II.3), deux scénarios doivent être discutés :

1. Comment puis-je obtenir le paramètre s si je connais la valeur de u ?
2. et inversement, comment obtenir u si la valeur de s est connue.

La réponse à ces deux questions n'est pas toujours tranchée et a fait l'objet de nombreuses études. Une de ces études est citée en exemple. [60][61].

II.4.2. Planification de trajectoire

Le deuxième défi associé au problème de planification de mouvement est de spécifier l'évolution dynamique du robot le long d'un chemin par une fonction temporelle appelée profil de mouvement. Un profil de mouvement est décrit comme un module qui permet de fixer les axes du robot en positions, vitesses ou accélérations (en fonction du temps) afin qu'il puisse accomplir la tâche spécifiée en tenant compte de la géométrie de la trajectoire prévue et des diverses contraintes dynamiques du système. Les problèmes les plus souvent considérés dans la littérature peuvent être classifiés en trois catégories [62] [63] :

- **Temps de mouvement minimum** : La minimisation de la planification de trajectoire a fait l'objet de nombreuses discussions dans la littérature scientifique depuis plus de 60 ans [64] [65] [66], principalement en raison des intérêts industriels à réduire la durée du cycle de production et à augmenter la productivité. Pour ces raisons, voire une des centaines d'articles scientifiques ont été écrits sur la présentation d'algorithmes de planification de trajectoire et la minimisation de l'indice de performance compte tenu du temps d'exécution. Pour un exemple, voir [67] .
- **Mouvement d'énergie minimum** : la plupart du temps, l'expression « énergie » est utilisée dans l'optimisation de la trajectoire, elle ne fait pas référence à une quantité physique mesurée en joules, mais elle fait plutôt partie intégrante des couples au carré et mesure l'effort fourni par les actionneurs. Cependant, il est également possible de trouver des algorithmes de planification dans la littérature où l'indice d'optimisation n'est qu'une mesure absolue de l'énergie. De nombreux éléments intéressants de planification de trajectoire basée sur des critères énergétiques sont présentés [68][69][70][71]. D'une part, il génère des trajectoires lisses et simples à suivre qui réduisent les contraintes sur les

actionneurs et de la structure du manipulateur.

D'autre part, cette technique permet des économies d'énergie, ce qui n'est pas seulement une question d'économie car cette caractéristique peut être requise par des applications particulières où la source d'énergie est limitée par des facteurs techniques, comme l'utilisation de robots dans l'espace, l'exploration en mer ou les tâches militaires.

- **Mouvement de Jerk minimum** : Ce problème survient généralement lorsque le temps d'exécution de la tâche est prédéterminé. La génération de trajectoires n'a pas besoin que les couples d'articulation aient des valeurs discontinues ; au lieu de cela, ce résultat est obtenu en plaçant des limites supérieures sur le taux de variation de l'accélération. Ce type de solutions nécessite le calcul de la dynamique du troisième ordre du manipulateur. Les résultats positifs de la minimisation de la secousse incluent la réduction des erreurs lors du suivi de la trajectoire, la réduction de l'excitation de la fréquence de résonance et la limitation des contraintes sur les structures du manipulateur et de l'actionneur, permettant des mouvements naturels et bien coordonnés.

En plus des problèmes mentionnés ci-dessus, certains critères d'optimisation hybrides, tels que l'énergie et le temps d'exécution des tâches, ont été proposés dans la littérature.

Remarque1 : Dans notre travail on considère les technique de planification des trajectoires basée sur l'approche découplée chemin-trajectoire. Dans la littérature, il existe des approches directes pour obtenir directement la caractérisation temporelle du mouvement sans passage par l'étape de planification du chemin. Ces méthodes sont connu sous le nom de planification « Kynodynamique », pour un aperçu voir [59].

II.5. Mouvement point à point (PTP)

Dans cette section on discute le problème général d'optimisation qui consiste à choisir la variable de commande d'un système physique afin de produire un mouvement d'un état à un autre selon un critère donné (temps, énergie ou jerk), tout en étant soumis aux contraintes fixes du système (vitesse, accélération, couple, etc.) et les conditions imposées par les points de départ et d'arrêt. Lorsqu'un chemin est prédéterminé, la seule information nécessaire est la longueur totale du chemin. Le terme variable de commande utilisé dans cette section implique la vitesse v du robot le long du chemin ou l'une de ces dérivées. Physiquement, cette vitesse est définie comme :

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad (\text{II.4})$$

D'où, s est toujours la longueur d'arc du chemin parcouru.

En raison de contraintes fixes présentées tout au long de ce type de mouvement, le fonctionnement du robot doit être typiquement divisé en trois phases : une phase d'accélération pour aider l'actionneur à atteindre sa vitesse maximale, une phase de déplacement à vitesse constante (maximale) et une phase de décélération pour aider le robot à atteindre sa vitesse désirée au point final. Les phases d'accélération et de décélération peuvent également être définies comme un ensemble de sous-phases (par exemple, accélération linéaire, constante, décélération linéaire) selon les besoins du système. Les transitions du système d'une phase à la suivante et le type de mouvement qui se produit tout au long de chaque phase définissent ce type de mouvement. On peut noter les approches suivantes pour synthétiser ce type de mouvement :

II.5.1. Fonctions harmoniques

Le problème d'optimisation (sans contraintes) ainsi défini peut s'exprimer sous la forme quadratiquement classique : déterminer $s(t)$ pour minimiser de la fonction J donnée par :

$$J = \int_0^{T_f} \left(\frac{d^n s(t)}{dt^n} \right)^2 dt \quad (\text{II.5})$$

Une approche alternative à ce problème est un polynôme d'ordre $2n-1$ défini comme :

$$s(t) = a_m s^{(2n-1)}(t) + a_{m-1} s^{(2n-2)}(t) + \dots + a_0 \quad (\text{II.6})$$

dont les coefficients a_i dépendront des conditions aux limites [72].

Le mouvement qui en résulte oscille toujours entre des phases où l'accélération est positive et négative, ce qui conduit naturellement à considérer la forme périodique des fonctions trigonométriques comme une méthode plus lisse pour définir une classe différente de profil de mouvement. La fonction sinus vérifie dans un premier temps les contraintes d'une loi du mouvement. Le paramètre d'accélération maximale A_m et la longueur du mouvement t_f seront alors utilisés pour définir la loi d'accélération :

$$\ddot{s}(t) = \dot{\xi}(t) = A_m \sin\left(2\pi \frac{t}{t_f}\right) (0 \leq t \leq t_f) \quad (\text{II.7})$$

De nombreuses lois du mouvement basées sur des fonctions trigonométriques sont envisageables, comme la loi des sinusoides carré d'accélération [73].

Remarque2 : Les algorithmes décrits dans cette partie sont les moyens les plus efficaces et les plus simples pour s'assurer que le mouvement généré est optimal. Ils ne tiennent toutefois pas compte des contraintes associées aux chemins planifiés ou de la nature dynamique du système en mouvement. La prise en compte de plusieurs caractéristiques intrinsèques aux systèmes robotiques, notamment la caractéristique de linéarisation par bouclage statique et dynamique,

résout efficacement ce dernier problème dans de nombreux cas.

II.5.2. Fonctions Bang Bang

L'idée de base derrière la loi de mouvement "Bang-Bang" est de faire passer la variable de contrôle du système - dans notre cas, l'accélération de référence - ou l'une de ses dérivées à un nombre prédéterminé de fois d'un niveau maximal à un niveau minimal autorisé. La nième dérivée de ce type de profil peut être créée en sommant des échelons de différentes amplitudes retardées dans le temps :

$$s_{ref}^{(n)}(t) = \left| s_{ref}^{(n)} \right|_{\max} \cdot \left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot H(t - T_i) \right) \quad (II.8)$$

Avec $\left| s_{ref}^{(n)} \right|$ représente la nième borne supérieure fixe de la dérivée de la position, H la fonction de Heaviside, et T_i les temps de commutation des échelons d'amplitude A_i . L'instant initial T_0 sera mis à zéro et l'instant final sera noté $T_n = T_f$. Les limitations sur les dérivées sont supposées symétriques, et les amplitudes A_i vérifient $A_i \in \{2, 1, -1, -2\}$. Un profil de mouvement de degré n est principalement défini par $2n + 1$ instants de commutation. Cette famille de profils est un résultat naturel de l'utilisation du principe d'optimisation de Pontriaguine [64]. Clairement, ce profil se distingue par les instants de commutations d'un état à l'autre. Ces instants sont obtenus en prenant en compte différentes limites sur les dérivées du mouvement et les conditions aux limites. Dans [59], une illustration de la façon de créer un profil de mouvement d'ordres deux et tenants compte des contraintes de vitesse et d'accélération. Cet exemple montre la complexité de définir un profil de mouvement avec un degré de continuité élevé et de prendre en compte divers facteurs aux points de départ et d'arrivée.

II.5.3. Fonctions polynomiales

On considère un robot à n degrés de liberté. Soient q^i et q^f les vecteurs de coordonnées conjoints correspondant aux configurations initiale et finale. Une fois la trajectoire calculée avec ces contraintes cinématiques, on peut procéder à une mise à l'échelle temporelle [41]. La trajectoire entre q^i et q^f est déterminée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} q(t) = q^i + r(t)D & \text{pour } 0 \leq t \leq t_f \\ \dot{q}(t) = \dot{r}(t)D \end{cases} \quad (II.9)$$

Avec $D = q^f - q^i$.

Les conditions aux limites de la fonction d'interpolation $r(t)$ sont données par

$$\begin{cases} r(0) = 0 \\ r(t_f) = 1 \end{cases}$$

L'équation II.9 peut être écrite aussi :

$$q(t) = q^f(t) - [1 - r(t)]D \quad (\text{II.10})$$

$$q(t) = q^f(t) - [1 - r(t)]D$$

ce qui est plus approprié pour le suivi d'objets en mouvement où q^f varie dans le temps. Dans ce cas, $D = q^f(0) - q^i$

Plusieurs fonctions d'interpolation peuvent fournir une trajectoire telle que $q(0) = q^i$ et $q(t_f) = q^f$.

II.5.3.1. Interpolation linéaire

La trajectoire du robot est décrite par une équation linéaire dans le temps. L'équation de la position du robot s'écrit :

$$q(t) = q^i + \frac{t}{t_f} D \quad (\text{II.11})$$

Avec cette trajectoire, la position est continue mais pas la vitesse. Cela induit des vibrations indésirables sur le robot et peut provoquer une usure prématurée des pièces mécaniques.

II.5.3.2. Polynôme cubique

Si les vitesses initiale et finale sont également mises à zéro, le degré minimum du polynôme satisfaisant aux contraintes est au moins égal à trois, et a la forme :

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (\text{II.12})$$

Les coefficients a_i sont déterminés à partir des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} a_0 = q_i \\ a_1 = 0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2} D \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3} D \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.12) peut aussi s'écrire sous la forme (II.9) ou (II.10) avec la fonction d'interpolation suivante :

$$r(t) = 3\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \quad (\text{II.14})$$

Le polynôme cubique assure la continuité de la vitesse mais pas de l'accélération. Pratiquement, les robots industriels sont suffisamment rigides pour que cette discontinuité soit filtrée par la structure mécanique. Par conséquent, une telle trajectoire est généralement satisfaisante pour la plupart des applications.

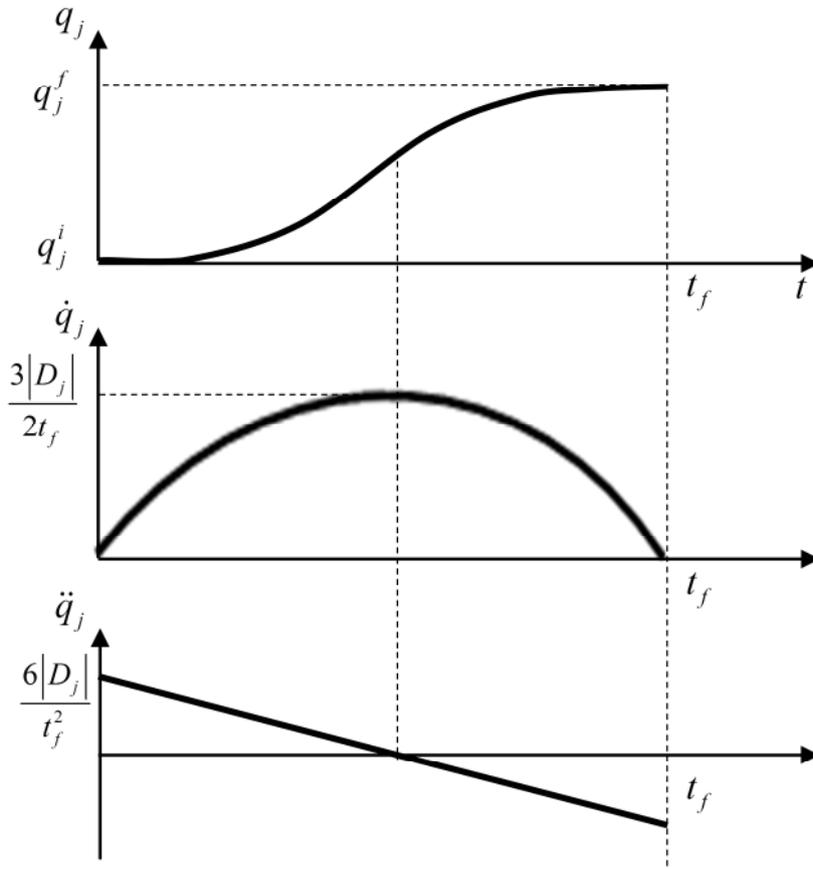


Figure II.3 Profils de position, de vitesse et d'accélération pour un polynôme cubique

La figure II.3 montre les profils de position, de vitesse et d'accélération pour l'articulation j .

La vitesse est maximale à $t = \frac{t_f}{2}$ et sa grandeur est donnée par :

$$|\dot{q}_{j\max}| = \frac{3|D_j|}{2t_f} \text{ avec } |D_j| = |q_j^f - q_j^i| \quad (\text{II.15})$$

L'accélération maximale se produit à $t = 0$ et $t = t_f$ avec l'amplitude :

$$|\ddot{q}_{j\max}| = \frac{6|D_j|}{t_f^2} \quad (\text{II.16})$$

II.5.3.3. Polynôme quintique

Pour les robots à grande vitesse ou lorsqu'un robot manipule des charges lourdes ou délicates, il convient également d'assurer la continuité des accélérations, afin d'éviter des résonances excitantes dans la mécanique. La trajectoire est dite de classe C^2 . Puisque six contraintes doivent être satisfaites, l'interpolation nécessite d'au moins un polynôme cinquième degré [Binford 77]. Les deux contraintes supplémentaires s'écrivent :

$$\begin{cases} \ddot{q}(0) = 0 \\ \ddot{q}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

La résolution des six contraintes donne la fonction d'interpolation suivante :

$$r(t) = 10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 \quad (\text{II.18})$$

La position, la vitesse et l'accélération par rapport au temps sont représentées sur la figure II.4. La vitesse et l'accélération maximales sont données par :

$$|\dot{q}_{j\max}| = \frac{15|D_j|}{8t_f} \quad (\text{II.19})$$

$$|\ddot{q}_{j\max}| = \frac{10|D_j|}{\sqrt{3}t_f^2} \quad (\text{II.20})$$

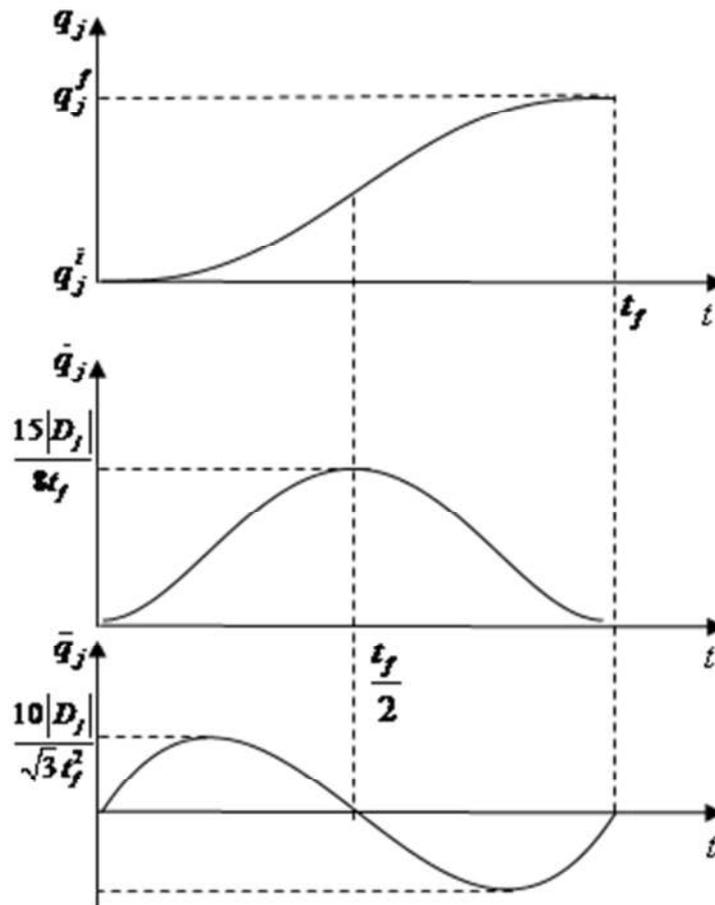


Figure II.4 Profils de position, de vitesse et d'accélération pour un polynôme quintique

II.6. Suivi des trajectoires

Dans cette section nous explorons les méthodes et les techniques développées dans le domaine de la robotique pour assurer l'exécution exacte et robuste des tâches planifiées.

II.6.1. Commande PID

Le régulateur PID (Proportionnel – Intégral Dérivé) est la base de la loi de commande PID pour concevoir un contrôleur. L'erreur du système, qui est la différence entre son état actuel et l'état désiré, est calculée par le régulateur PID, et une commande est calculée pour minimiser cette erreur. Les trois paramètres du régulateur P relatif à l'erreur courante, I relatif à l'accumulation des erreurs passées, et D relatif à la prédiction des erreurs futures sont ajustés pour déterminer la commande. Ces trois paramètres doivent être choisis pour minimiser l'erreur de réponse statistique par rapport à la consigne, les oscillations et le dépassement de réponse.

Un régulateur basé sur la linéarisation du système et l'utilisation d'un régulateur proportionnel dérivé est présenté dans [74]. Afin de suivre n'importe quel chemin curviligne, la commande générée par cette approche de contrôle peut être appliquée à des robots unicycles ou même des robots à deux roues (avant et arrière) directionnelles. Un robot unicycle est contrôlé par sa

vitesse angulaire, tandis qu'un robot à deux roues directionnelles est contrôlé par deux variables : la première commande contrôle l'angle de braquage de la roue avant, et la deuxième commande contrôle la distance du centre de la roue avant au centre instantané de rotation du robot. La figure suivante affiche les paramètres PID pour la commande du robot :

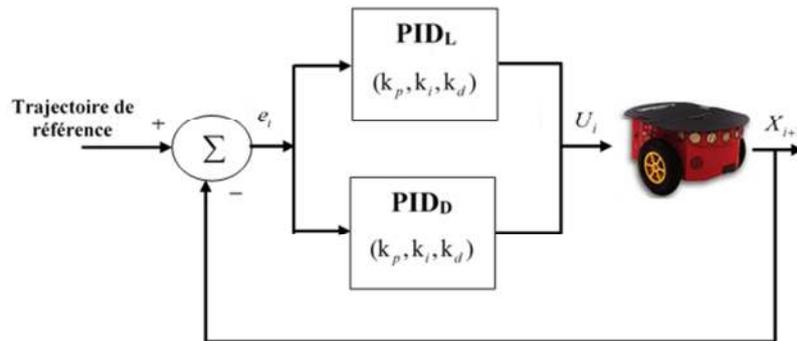


Figure II.2 Schéma du contrôleur PID

Les paramètres de contrôle PID sont k_p, k_i et k_d . Des études sur l'asservissement longitudinal et latéral des véhicules de convoi proposent également un régulateur PID destiné à réduire l'erreur angulaire entre un groupe de robots successifs d'un convoi [75]. L'erreur d'angle est identifiée comme la différence entre l'orientation actuelle du robot et son orientation désirée une fois que l'orientation désirée du robot a été calculée. Un régulateur PID est ensuite appliqué pour maintenir cette erreur autour de zéro.

Le contrôleur développé dans ces travaux n'assure pas la stabilité asymptotique du système puisque des oscillations non-bornées se produisent tout au long du processus de suivi. De plus, le suivi n'est pas précis, notamment en ce qui concerne les virages : en visant l'arrière du robot prédécesseur, le robot coupe les virages et dévie du chemin emprunté par son prédécesseur. Les auteurs proposent des lois de commande supplémentaires plus compliquées et ont été synthétisées à partir de polynômes d'ordre 3 et 4 afin d'améliorer la précision du suivi. Ils proposent alors une approche différente qui consiste à mémoriser le chemin parcouru par le prédécesseur pour minimiser l'écart latéral entre le chemin du leader et celui des suiveurs.

II.6.2. Commande par linéarisation

La majorité des tâches confiées aux robots sont délicates et demandent une extrême précision sous des trajectoires rapides. Les avancées de la recherche au cours des dernières décennies ont permis l'émergence de nouvelles stratégies de contrôle des robots manipulateurs. Ces stratégies incluent celles basées sur la linéarisation et le découplage du système. Elles sont également connue sous le nom de commande linéaire ou de commande en couple calculé. La notion de la commande linéaire à paramètres connus et constants est issue des premières recherches sur cette technique de commande. La mise en œuvre de cette loi de commande nécessite une connaissance

approfondie du modèle du robot. Une telle circonstance rend cette commande idéale. Cependant, compte tenu des perturbations agissant sur le robot, il est assez difficile de répondre à cette exigence dans la pratique.

Il est possible de formuler le problème de suivi de trajectoire de convoi de robots (ligne droite) comme un problème d'optimisation sous contrainte [74]. Le modèle dynamique du mouvement longitudinal du véhicule s'exprime sous la forme de deux équations : la première équation représente la dynamique du moteur du véhicule, et la deuxième équation représente le mouvement du véhicule exprimée par la deuxième loi de Newton.

Certains auteurs ont formalisé le problème de suivi de trajectoire comme un problème d'optimisation et ont linéarisé le comportement dynamique du robot en utilisant des techniques de linéarisation exacte [76]. Ils proposent alors un contrôleur dont les constantes sont calculées pour stabiliser les fonctions de transfert des véhicules. Les approches de linéarisation exacte présentent certains inconvénients, notamment l'incapacité de résoudre les problèmes de robustesse et d'atténuation des perturbations, ainsi que la limitation selon laquelle tous les systèmes ne peuvent pas être linéarisés avec précision tout en maintenant simultanément leur stabilité [76]. Les travaux effectués des robots mobiles ont montré qu'une linéarisation précise du modèle cinématique d'un robot mobile n'est pas possible [74]. Cependant, il est possible de les transformer en systèmes chaînés dans lesquels le contrôle longitudinal et latéral sera découplé et conçus de façon indépendante.

II.6.3. Commande par Backstepping

Cette méthode donne un outil pour la conception récursive de la loi de commande basée sur la théorie de Lyapunov. La méthodologie du Backstepping peut se définir comme une façon d'organiser un système en plusieurs sous-systèmes en cascade. L'exploitation de la méthodologie de conception sur un plan général aboutit à la mise en place d'une loi de commande par rétroaction associée systématiquement à une fonction de Lyapunov ou l'équivalent. La théorie de Lyapunov a été pendant longtemps un outil important dans les systèmes linéaires aussi bien que dans la commande non linéaire. Cependant, son utilisation dans la commande non linéaire est limitée à cause de la difficulté de trouver la fonction de Lyapunov pour un système donné.

Le travail présenté dans [77] permet l'intégration d'un contrôleur cinématique et d'un contrôleur de couple pour des robots mobiles non holonomes. Une loi combinée cinématique / contrôle de couple est développée en utilisant le Backstepping et la stabilité asymptotique est garantie par la théorie de Lyapunov. De plus, cet algorithme de contrôle peut être appliqué aux trois problèmes de navigation de base: le suivi de chemin, le suivi de trajectoire et la stabilisation de configuration fixe [74].

Les propriétés importantes de la stabilité globale ou de chaque sous-système s'obtiennent en définissant une fonction stabilisatrice à chaque étape de représentation du modèle en sous-systèmes en cascade. Un des avantages que procure la méthode du Backstepping est celui de garder les propriétés du système initial dans la loi de commande obtenue. Ceci constitue en quelque sorte la particularité du Backstepping par rapport à d'autres méthodes. Tout comme dans [78], les travaux menés dans [21] sont basés sur le Backstepping. Le robot mobile sur lequel ont été faits les tests est un robot mobile à entraînement différentiel. Les applications faites sur les modèles cinématique et dynamique prouvent que le contrôleur conçu sur la base du Backstepping est stable et performant.

Des méthodes de contrôle robustes telles que la commande par mode glissant et les commandes adaptatives et intelligentes, telles que la logique floue et la commande par réseau de neurones sont des solutions possibles au problème de la commande de robots mobiles.

II.6.4. Commande par mode glissant

La commande à structure variable (commande par mode glissant) est une commande robuste. Des travaux sur la technique de la commande par mode glissant pour les robots mobiles non holonomes ont été effectués dans [79] [80] [81] [7] et [8].

Cette loi de commande a pour principe de contraindre l'état du système à atteindre en un temps fini une hyper surface (surface de glissement) et à y rester. Compte tenu des caractéristiques intrinsèques des robots mobiles telles que la dynamique du véhicule, les limites d'inertie et de puissance des actionneurs et les erreurs de localisation, leurs équations dynamiques ne peuvent pas être décrites comme un modèle mathématique simplifié. Les avantages que présente ce contrôleur sont: la rapidité, une bonne réponse transitoire et la robustesse en ce qui concerne l'incertitude des paramètres.

Le modèle dynamique d'un robot mobile permet de décrire son comportement avec des perturbations bornées. La dynamique des erreurs du robot mobile est linéarisée au moyen d'une méthode de couple pré-calculé et la loi de commande par mode glissant est appliquée pour stabiliser le robot sur une trajectoire de référence et compenser les perturbations existantes.

Le schéma de contrôle que propose [82] a la capacité de résoudre le problème de suivi de trajectoire basé sur la modélisation dynamique lorsque la trajectoire de référence n'est pas fermée. Il est démontré qu'en appliquant la commande par mode glissant, le comportement du contrôleur du robot mobile est robuste par rapport aux erreurs d'état initiales et les perturbations externes telles que les erreurs d'intégration, le bruit dans le signal de commande et les erreurs de localisation [12]

Le principal problème de ce contrôleur est qu'il nécessite la connaissance parfaite du modèle

dynamique du robot afin de pouvoir calculer le couple. Lorsque nous voulons effectuer la linéarisation par retour d'état du modèle dynamique non linéaire du système, nous devons connaître la dynamique exacte du robot. Cet inconvénient nous amène à utiliser un contrôleur adaptatif ou intelligent avec capacité d'apprentissage.

Tant de méthodes différentes de contrôle adaptatif et intelligent peuvent être utilisées pour résoudre ce problème.

II.6.5. Commande adaptative

Les méthodes de commande adaptatives pour le suivi des robots mobiles à roues ont été proposées dans [82] [82] [83] et [84]. Dans [85], l'auteur propose un contrôleur dynamique pour le suivi de trajectoire d'un robot mobile à roues. La commande est basée sur le mode glissant adaptatif. Un contrôleur adaptatif qui permet d'assurer le suivi de trajectoire d'un robot mobile autonome est utilisé dans [83]. Un contrôleur cinématique permet de générer les vitesses linéaires et angulaires de référence. Ces dernières associées aux vitesses du modèle dynamique permettent d'élaborer une loi d'adaptation des paramètres du robot. Cette boucle, étant mise à jour à tout instant, permet de réduire considérablement les erreurs et d'augmenter la performance du contrôleur. La théorie de Lyapunov permet d'analyser la stabilité du système.

Un contrôleur robuste et adaptatif est élaboré dans [84]. Tout d'abord, le suivi de trajectoire du robot mobile est converti en un problème de stabilisation d'un système à double intégrale. Ensuite une loi de contrôle est utilisée pour concevoir un contrôleur de suivi. Par après, un observateur de perturbation et un compensateur adaptatif sont conçus pour fonctionner avec le contrôleur cinématique de suivi afin de traiter les incertitudes du robot. Enfin, une loi adaptative de commutation est conçue pour atténuer l'effet de commutation dans le compensateur adaptatif. En conséquence, le système de commande donne la limite ultime de l'erreur de poursuite et du gain adaptatif.

II.6.6. Commande par platitude

La technique de platitude différentielle est une propriété structurelle d'une classe de systèmes dynamiques non linéaires [86][87][88]. Elle fournit un cadre d'analyse unifié pour la planification de la trajectoire et le contrôle des systèmes non linéaires. La condition nécessaire pour qu'un système de commande soit différentiellement plat est qu'il doit être commandé. En général, le système de commande est différentiellement plat s'il existe un ensemble de sorties, appelées sorties plates, en nombre égal au nombre d'entrées, tels que tous les états et les entrées peuvent être exprimés en termes algébriques de ces sorties et d'un nombre fini de leurs dérivés. On peut noter que les sorties plates (ou le concept de linéarisation par bouclage) sont la prolongation au domaine non linéaire des sorties de Brunovsky et de la mise sous forme

canonique commandable d'un système linéaire stationnaire. Le concept de platitude est très utilisé dans les situations qui exigent la génération des trajectoires optimales. Les sorties plates d'un système non-linéaire permettent surtout de planifier très simplement les mouvements faisables d'un système robotisé pour aller d'un état vers un autre, tout en respectant des limites différentielles sur le mouvement du système (planification de trajectoires sous contraintes cinématiques). Elles permettent également de construire le bouclage ("feedback") qui assure le suivi asymptotique d'une trajectoire de référence arbitraire (stabilisation par placement de pôles). L'un des principaux problèmes est l'existence d'un critère calculable pour décider si le système non linéaire est plat. Cela signifie qu'il n'existe pas de méthode systématique pour construire une sortie plate. La situation est en fait un peu analogue à celle des fonctions de Lyapunov. Elles sont très utiles à la fois d'un point de vue théorique bien qu'il n'y ait pas de méthodologie de calcul proprement dite. Cependant, de nombreux systèmes réels sont plats, la notion de platitude a donc un grand intérêt pratique. Le problème de suivi des trajectoires pour un système plat (linéarisable par bouclage) peut être résolu avec une loi de commande basée sur le principe d'équivalence par bouclage dynamique endogène. En réalité, cette équivalence est exprimée comme une fonction des sorties plates, ses dérivées et d'autres paramètres dynamiques (masse, inertie, ...) du système. Le succès dans la réalisation des objectifs du contrôleur dépend beaucoup de ce qui est pris en compte dans le modèle considéré, la précision des différenciateurs temps réel associé avec le contrôleur pour estimer les dérivées des sorties plates et la certitude de connaissance des paramètres du système. Malgré l'efficacité des contrôleurs basés sur une linéarisation dynamique endogène dans le rejet des perturbations externes, comme le montrent [17], le problème de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques et non-paramétriques reste non résolu par des techniques de commande conventionnelles est fortement posé dans ce cas. De plus, le problème est plus compliqué dans le cas où les paramètres du système sont totalement inconnus ou variant dans le temps. On peut noter aussi que le concept de platitude forme une approche de linéarisation dite (entrées-sortie plates) qui partage avec les techniques de linéarisation entrée-sortie le problème de stabilité du dynamique interne dénoté "dynamique de zéro", essentiellement dans le cas où les sorties plates du système ne se confondent pas avec les sorties du système. Malgré ces critiques reliés principalement à la robustesse de cette approche, elle peut être vue comme un bon point de départ vers des solutions plus efficace. Cette approche peut répondre au problème de planification de mouvement (ou commande en boucle ouverte dans le contexte de contrôle). Elles permettent d'assurer la génération des commandes lisses qui répondent aux différentes exigences et limites de commandes d'un système robotique. Plusieurs travaux utilisent le contrôle de suivi de trajectoires pour un robot par l'approche de la platitude et

par le contrôleur flou (FLC). Les fondements de ces deux dernières techniques sont le sujet des deux chapitres suivants.

II.7. Conclusion

Les applications robotiques font face à un défi fondamental avec la planification de trajectoire. Un élément essentiel pour assurer l'efficacité des résultats obtenus en termes d'optimalité, de simplicité et d'adaptabilité est la capacité à générer des chemins à partir des caractéristiques données. Dans ce chapitre, les deux problèmes fondamentaux qui sont la planification de trajectoire et de génération de trajectoire sont identifiés. L'approche de planification découplée Chemin- Trajectoire a permis d'identifier un certain nombre de solutions au problème général de la planification des déplacements efficaces en tenant compte de divers types de critères sous diverses contraintes.

En conclusion, l'algorithme qui résume l'approche de planification découplée peut être le suivant :

- calculer un chemin $P(u)$;
- calculer l'abscisse curviligne $s(u)$ le long de la trajectoire ;
- calculer l'historique temporel $s(t)$;
- calculer $u(t)$;
- calculer la trajectoire $P(t)$.

L'historique temporel peut être calculé comme indiqué précédemment pour l'abscisse curviligne s .

CHAPITRE III

COMMANDE D'UN ROBOT MOBILE AVEC DES CONTRAINTES NON-HOLONOMES

III.1. Introduction

La commande des robots mobiles à roues différentielles restera toujours le sujet de nombreuses études de recherches. En particulier, les contraintes non holonomes associées à ces systèmes, ont motivé le développement de plusieurs techniques de commande non linéaires [9]. Ce type de contraintes réduit l'espace des solutions possibles pour les tâches de planification de mouvement et de la conception de commande.

Dans ce chapitre nous allons présenter et valider une technique de commande pour la manipulation efficace des robots mobiles avec des contraintes non holonomes. Cette approche est d'abord définie pour assurer la génération de trajectoires de référence en respectant différents types de contraintes, puis une rétroaction endogène auto-ajustée est alors conçue pour assurer un suivi précis et robuste des trajectoires désirées malgré les incertitudes.

III.2. Modélisation et Commande d'un Robot mobile à roues différentielles

III.2.1. Modélisation du Pioneer 3DX

Le robot mobile étudié (Pioneer 3DX considéré) est représentée sur la figure III.1.a. Il possède deux roues motrices diamétralement opposées avec un rayon r et un axe de longueur l (le modèle simplifié du robot est présenté dans la figure III.1.b). La position du robot dans le plan est décrite, par rapport à un référentiel inertiel arbitraire $F_R(O, X, Y)$ par le vecteur de position suivant :

$$q = [x, y, \theta, \varphi_D, \varphi_G]^T$$

où x et y désignent les coordonnées cartésiennes du centre de masse (C), $\theta \in [-\pi, +\pi]$ désigne l'orientation du robot mesurée dans le sens antihoraire à partir de l'axe x , φ_D et φ_G sont les déplacements angulaires des roues gauche et droite respectivement. Définissons le repère mobile $F_b(O, x_b, y_b)$ qui est fixé au centre (C) et se déplace avec le robot. Pour obtenir l'équation de mouvement d'un tel modèle, trois équations de contraintes peuvent être définies comme [89]

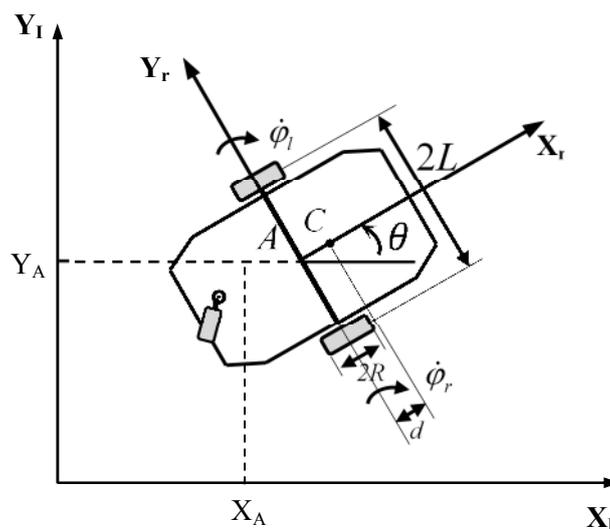
$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0 \quad (\text{III.1})$$

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta + \frac{l}{2} \dot{\theta} - r \dot{\phi}_D = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta - \frac{l}{2} \dot{\theta} - r \dot{\phi}_G = 0 \quad (\text{III.3})$$



(a) Pioneer 3dx



(b) Model simplifié

Figure III.1 Robot mobile à deux roues différentielles: Pioneer 3DX.

- La première contrainte (III.1) est dérivée du fait que le vecteur de vitesse du robot est toujours le long de l'axe X_A . En d'autres termes, la composante latérale du vecteur de vitesse (celle qui est normale aux roues, c'est-à-dire le long de Y_A) est nulle.
- Les deux autres équations de contraintes (III.2 et III.3) sont obtenues à partir de l'hypothèse que les roues roulent sans glissement.

Parmi les équations de contraintes données ci-dessus, il existe une contrainte holonome cachée qui peut être obtenue en soustrayant (III.3) de (III.2) pour obtenir:

$$l\dot{\theta} = r(\dot{\varphi}_G - \dot{\varphi}_D) \text{ ou } l\theta = r(\varphi_G - \varphi_D) + C \quad (\text{III.4})$$

Le système d'équations (III.1), (III.2) et (III.3) peut être réorganisé sous la forme matricielle suivante:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta & -\sin \theta & \frac{l}{2} & 0 & r \\ -\cos \theta & -\sin \theta & -\frac{l}{2} & r & 0 \end{bmatrix}}_{R(q)} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_D \\ \dot{\varphi}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

où $R(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 5}$ a un $\text{rang}(R(q)) = 3$. L'équation (III.5) implique que le vecteur de vitesse \dot{q} est dans un espace nul de $R(q)$, ce qui signifie qu'il est possible de trouver un vecteur de vitesses auxiliaires $V = [v_1 \ v_2]^T \in \mathbb{R}^2$ tel que:

$$\dot{q} = S(q).V \quad (\text{III.6})$$

où $S(q) \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$: représente une matrice de rang complet qui s'étend vers l'espace nul de la matrice $R(q)$. Ainsi, $S(q)$ est définie comme:

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{l} & -\frac{r}{l} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

À partir de (III.6) et (III.7), on peut facilement montrer que le vecteur de vitesse auxiliaire V peut être défini comme:

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_D \\ \dot{\varphi}_G \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Par une simple comparaison entre le modèle cinématique (III.7) (III.8) et le modèle cinématique bien connu des robots mobiles unicycle, le modèle Pioneer 3DX peut être réorganisé comme:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{2} \\ 1 & -\frac{l}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

où v et ω sont les vitesses linéaire et angulaire du robot, et $v_D = r\dot{\phi}_D$ et $v_G = r\dot{\phi}_G$ sont les vitesses linéaires des roues droite et gauche.

III.2.2. Propriétés du modèle et présentation générale de la conception de commande

Le modèle cinématique (III.9) et (III.10) du robot mobile s'appartient à la classe des systèmes non linéaires « driftless » qui sont spécifiés par les propriétés suivantes:

- Cette classe de systèmes ne peut pas être linéarisée par une loi de commande à rétroaction statique.
- Puisque le système est décrit par deux entrées $n = 2$ et trois états $m = 3$, le système est donc plat et linéarisable par rétroaction dynamique [17], [90].
- Contrairement au cas général des systèmes non linéaires, où la stabilisation de la posture peut être résolue comme un cas particulier du problème général de la conception de commande de suivi, ce formalisme ne peut pas être envisagé pour cette classe de systèmes. Une limitation importante qui doit être pris en compte dans le cas de stabilisation de la posture est que la stabilité dans le sens de Lyapunov ne peut pas être obtenue avec une loi de commande de rétroaction de temps invariant lisse lorsque $n \neq m$.

Dans ce chapitre, et sur la base de la platitude, nous ciblons la conception d'une loi de commande adaptative unique pour assurer à la fois les fonctions de stabilisation de la position du robot et de suivi des trajectoires.

III.3. Planification de trajectoire sous les contraintes non-holonomes

Pour résoudre le problème de la planification de mouvement sous les contraintes cinématiques et géométriques, où le chemin d'espace de configuration résultant satisfera les contraintes non holonomes de l'équation (III.1), un algorithme de trois étapes est proposé:

Algorithme 1: Planification de trajectoires

Les entrées: Configurations initiale et finale $(x_i \ y_i \ \theta_i), (x_f \ y_f \ \theta_f)$
Les sorties: Trajectoires désirées $: r_d(t) = [x_d(t) \ y_d(t) \ \theta_d(t)]$

Etape1: Planification du chemin
Etape2: Paramétrisation curvilignes
Etape3: Conception de profil de mouvement

La première étape de l'algorithme ci-dessus consiste à définir le chemin approprié qui relie la configuration initiale à celle désirée tout en respectant les contraintes non holonomes (III.1). En particulier, considérons le problème de la planification des chemins qui conduit le robot d'une configuration initiale sur $q(u_i) = q_i = [x_i \ y_i \ \theta_i]^T$ à une configuration finale $q(u_f) = q_f = [x_f \ y_f \ \theta_f]^T$. Le problème peut être résolu en utilisant, par exemple, les polynômes cubiques suivants :

$$\begin{aligned} x_d(u) &= u^3 x_f - (u-1)^3 x_i + \alpha_x u^2 (u-1) + \beta_x u (u-1)^2 \\ y_d(u) &= u^3 y_f - (u-1)^3 y_i + \alpha_y u^2 (u-1) + \beta_y u (u-1)^2 \end{aligned} \quad (III.11)$$

qui satisfont les conditions aux limites x_i, y_i et x_f, y_f respectivement, avec $: 0 \leq u \leq 1$

Afin d'assurer les contraintes non holonomes (III.1), un choix possible des paramètres $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x$ et β_y est donné comme:

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \cos \theta_f - 3x_f \\ k \sin \theta_f - 3y_f \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \cos \theta_i + 3x_f \\ k \sin \theta_i + 3y_i \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Le chemin obtenu est influencé par le choix de k_i et k_f , c'est-à-dire de vérifier que $v(0) = k_i$ et $v(1) = k_f$

De plus, on peut noter que:

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= k_i \cos \theta_i ; \quad \dot{x}(1) = k_f \cos \theta_f \\ \dot{y}(0) &= k_i \sin \theta_i ; \quad \dot{y}(1) = k_f \sin \theta_f \end{aligned} \quad (III.13)$$

Ainsi, on conclut que $k_i \neq 0, k_f \neq 0$ doivent avoir le même signe. Cette condition est essentielle pour garantir que le robot arrive à la configuration finale q_f avec son orientation spécifiée.

Une fois le chemin réalisable qui amène le robot à sa configuration désirée est obtenu, le

problème de la planification des mouvements se transforme en problème d'optimisation c.à.d trouver une fonction appropriée qui assure le mouvement rapide du robot tout en tenant compte de toutes les limites physiques du système. La solution à ce problème nécessite un paramétrage correct du chemin planifié, étape 2 dans l'algorithme 1. Elle consiste à fournir un paramétrage de la longueur de l'arc de la trajectoire planifiée. Cette technique de paramétrage est bien préférable dans de nombreux domaines car elle permet par la suite de contrôler simultanément le positionnement et la vitesse de déplacement du robot. L'équation qui définit l'abscisse curviligne s à partir de n'importe quelle paramétrisation donnée τ est donnée par:

$$\frac{ds(\tau)}{d\tau} = \left\| \frac{dQ(\tau)}{d\tau} \right\| = \sqrt{\left[\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right]^2 + \left[\frac{dy(\tau)}{d\tau} \right]^2} \quad (\text{III.14})$$

où $\left\| \frac{dQ(\tau)}{d\tau} \right\|$ désigne la norme euclidienne de la courbe paramétrée. L'intégration de l'équation (II.2) donne l'abscisse curviligne s en fonction de τ comme suit:

$$s = \int \frac{ds(\tau)}{d\tau} du = \int \left\| \frac{dQ(\tau)}{d\tau} \right\| du \quad (\text{III.15})$$

De plus, la longueur totale du chemin parcouru peut être obtenue en prenant $u = u_{\max}$ pour obtenir:

$$L = \int \frac{ds(\tau)}{d\tau} du = \int \left\| \frac{dQ(\tau)}{d\tau} \right\| du \quad (\text{III.16})$$

Ainsi, les trajectoires de référence dépendantes du temps peuvent être trouvées directement en définissant le paramètre s en fonction du temps $s = s(t)$. La vitesse du robot dans ce cas est:

$$v(t) = \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} = v(s) \dot{s}(t) \quad (\text{III.17})$$

En utilisant le fait que $v(s) = 1$, on peut obtenir:

$$v(t) = \dot{s}(t) \quad (\text{III.18})$$

La dernière équation montre la dépendance linéaire entre la vitesse du robot et la première dérivée temporelle du profile de mouvement $s(t)$. Cette relation peut être utile dans la conception d'une fonction de mouvement appropriée qui respecte les limites physiques du système. Un choix raisonnable de la fonction $s(t)$ est donné comme suit (step3 dans l'algorithme1):

$$s(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t^5 + a_0, \quad 0 < t < T \quad (\text{III.19})$$

où les paramètres a_i et tout le temps d'exécution T sont choisis pour garantir les conditions aux limites du mouvement et les limites maximales du robot. Ce choix assure une continuité suffisante de la vitesse du robot ainsi que ses dérivées (tableau III.1).

Conditions terminales des variables d'état	Conditions terminales des sorties plates
$x(0), y(0), \theta(0), v(0), \dot{v}(0), \omega(0)$	$F_1(0), \dot{F}_1(0), \ddot{F}_1(0), F_2(0), \dot{F}_2(0), \ddot{F}_2(0)$
$x(t_f), y(t_f), \theta(t_f), v(t_f), \dot{v}(t_f), \omega(t_f)$	$F_1(t_f), \dot{F}_1(t_f), \ddot{F}_1(t_f), F_2(t_f), \dot{F}_2(t_f), \ddot{F}_2(t_f)$

Tableau III.1 Conditions terminales des variables d'état

III.4. Conception de la loi de commande

Après la génération des trajectoires désirées du robot, une question liée au problème de contrôle de mouvement est l'exécution précise des tâches planifiées. Pour le robot mobile, Pioneer 3dx, défini par le modèle simplifié (III.9) et (III.10), leurs coordonnées cartésiennes x et y sont choisies comme sorties plates. Pour atteindre la condition de la platitude du robot, il faut différencier F , où $F = (F_1, F_2) = (x, y)$, jusqu'à l'apparition des entrées de commande v et ω [4] Prenant la première dérivée du vecteur F pour obtenir:

$$\dot{F} = \begin{bmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

On note que ω n'apparaît pas, donc la dérivée seconde de (III.20) est:

$$\begin{bmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -v \sin \theta \\ \sin \theta & v \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

où $z_1 = \dot{v}$, $\omega = \dot{\theta}$ et $\beta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -v \sin \theta \\ \sin \theta & v \cos \theta \end{bmatrix}$

On voit bien que ω s'apparaît dans III.21 donc on peut procéder les variables du système comme suit:

$$\begin{aligned}
(x, y) &= (F_1, F_2) \\
v &= \sqrt{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2} \\
\theta &= \tan^{-1} \left(\frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_1} \right) \\
z_1 = \dot{v} &= \frac{\dot{F}_1 \ddot{F}_1 + \dot{F}_2 \ddot{F}_2}{\sqrt{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2}} \\
\omega = \dot{\theta} &= \frac{\dot{F}_1 \ddot{F}_2 - \dot{F}_2 \ddot{F}_1}{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2}
\end{aligned} \tag{III.22}$$

À partir de (III.22), on remarque que toutes les variables d'état et les entrées du système sont exprimées en termes des sorties plates proposées et de leurs dérivées, donc on en déduit que le système est différentiellement plat. Par conséquent, on utilise la relation de difféomorphisme pour établir la relation entre la sortie plate et l'espace d'état du système. Cette relation permet la contrôlabilité des états du système dans l'espace de sorties plates.

$$\begin{aligned}
F_1 &= x \\
F_2 &= y \\
\dot{F}_1 &= v \cos \theta \\
\dot{F}_2 &= v \sin \theta \\
\ddot{F}_1 &= z_1 \cos \theta - v \omega \sin \theta \\
\ddot{F}_2 &= z_1 \sin \theta + v \omega \cos \theta
\end{aligned} \tag{III.23}$$

Puis nous introduisons une rétroaction linéarisante de la forme:

$$U = [u_1 \ u_2]^T \tag{III.24}$$

on obtient:

$$\begin{bmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{III.25}$$

où u_1 et u_2 sont de nouvelles entrées de commande. L'équation (III.25) représente un processus simple composé de deux doubles intégrateurs découplés ce qui facilite la planification de mouvement et la conception d'une loi de commande qui assure le suivi des trajectoires désirées. Comme il est indiqué dans le schéma de principe de la technique proposée (Figure III.2), les commandes u_1 et u_2 peuvent être définies comme suit:

$$\begin{aligned} u_1 &= \ddot{F}_{1d} + k_{d1}(\dot{F}_{1d} - \dot{F}_1) + k_{p1}(F_{1d} - F_1) \\ u_2 &= \ddot{F}_{2d} + k_{d2}(\dot{F}_{2d} - \dot{F}_2) + k_{p2}(F_{2d} - F_2) \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

où F_{1d} et F_{2d} sont les trajectoires désirées et k_{d1} , k_{p1} , k_{d2} et k_{p2} sont les gains de contrôle (III.26) qui doivent être sélectionnés pour que les pôles de l'équation de l'erreur (III.27) aient une partie réelle négative:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 + k_{d1}\dot{e}_1 + k_{p1}e_1 &= 0 \\ \ddot{e}_2 + k_{d2}\dot{e}_2 + k_{p2}e_2 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

Où : $e_i = F_{id} - F_i$, $i = 1, 2$

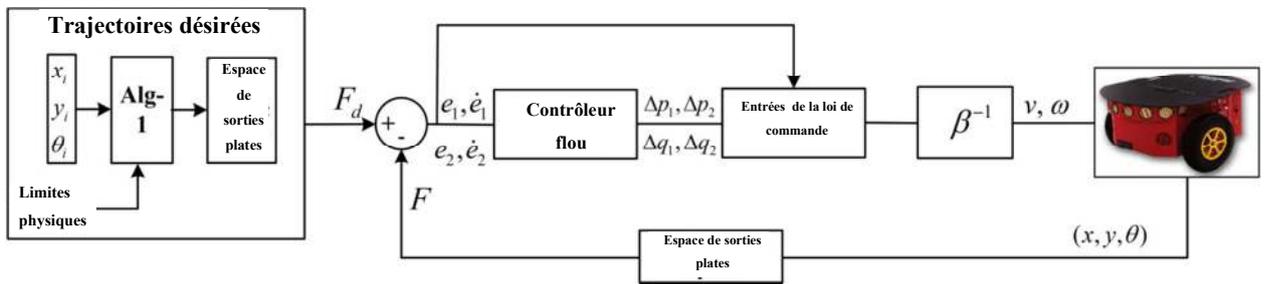


Figure III.2 Le bloc diagramme de la technique proposée

Remarque1:

La première égalité dans (III.22) donne le vecteur des trajectoires désirées dans l'espace de sorties plates comme: $F_{1d} = x_d$; $F_{2d} = y_d$

Par conséquent, toute trajectoire réalisable définie selon l'algorithme 1 donné dans la section III.3 (qui respecte les contraintes non holonomes (III.1) - (III.3)) représente une trajectoire réalisable dans l'espace de sortie plate.

De toute évidence, la seule condition requise dans la sélection des paramètres du contrôleur est que : k_{di} et $k_{pi} > 0$. Le reste de cette section traite une méthode de réglage des gains de commande qui n'utilise pas de modèle explicite du processus. Il se base sur l'idée d'adapter les gains du contrôleur aux changements d'erreurs de suivi et de leurs dérivées, en utilisant un contrôleur flou approprié. Les gains du contrôleur en (III.27) sont redéfinis comme:

$$\begin{aligned} k_{d1} &= p_1 + \Delta p_1 \\ k_{p1} &= p_2 + \Delta p_2 \\ k_{d2} &= q_1 + \Delta q_1 \\ k_{p2} &= q_2 + \Delta q_2 \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

Où p_1, p_2, q_1, q_2 sont des paramètres constants et $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta q_1, \Delta q_2$ font partie des paramètres

ajustés par le contrôleur flou. Les entrées et les sorties du contrôleur flou sont $e_{1,2}, \dot{e}_{1,2}$ et $\Delta p_{1,2}, \Delta q_{1,2}$ respectivement, comme il est défini dans les équations (III.27), (III.28), et présenté dans la figure III.3.

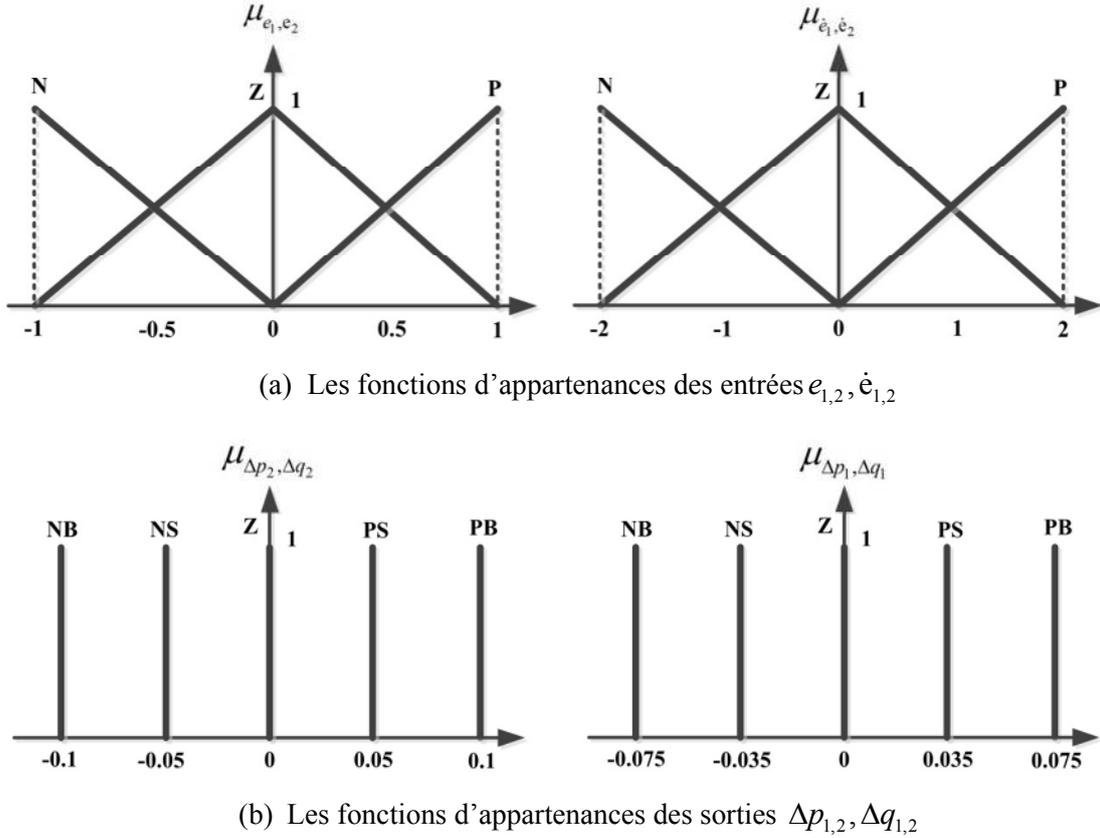


Figure III.3 Les fonctions d'appartenances des entrées et des sorties du contrôleur flou

Les fonctions d'appartenance des entrées du contrôleur flou, représentées sur la Figure III.3.a, ont la forme triangulaire avec trois ensembles flous notés négatif (**N**), zéro (**Z**) et positif (**P**), et l'univers de discours de $e_{1,2}$ et $\dot{e}_{1,2}$ est normalisé dans la plage de $[-1, 1]$ et $[-2, 2]$ respectivement. Les fonctions d'appartenance des sorties du contrôleur flou $\Delta p_{1,2}, \Delta q_{1,2}$ sont représentées comme des constantes sur la figure III.3.b., avec cinq partitions notées négatif petit (**NB**), négatif grand (**NS**), zéro (**Z**), positif petit (**PS**), et positif grand (**PB**). Les règles floues sont données sur le Tableau III.2.

$\dot{e}_i \backslash e_i$	N	Z	P
N	NB/PB	NS/PS	Z/Z
Z	NS/PS	Z/Z	PS/NS
P	Z/Z	PS/NS	PB/NB

Tableau III.2 Les règles d'inférence du contrôleur flou

La défuzzification exécute un mappage des ensembles flous vers les points singletons dans l'espace de sortie $\Delta p_{1,2}, \Delta q_{1,2}$. La sortie du contrôleur flou ; avec fuzzification singleton, produit d'inférence, défuzzification avec moyenne pondérée (la méthode de Takagi-Sugeno) et fonction d'appartenance triangulaire ; peut-être écrite sous la forme :

$$\Delta p_{1,2} = \frac{\sum_{l=1}^9 \Delta p_{1,2} \min_{i=1}^2 \mu_{A_i}^l(e_1, \dot{e}_1)}{\sum_{l=1}^9 \min_{i=1}^2 \mu_{A_i}^l(e_1, \dot{e}_1)} \quad (III.29)$$

$$\Delta q_{1,2} = \frac{\sum_{l=1}^9 \Delta q_{1,2} \min_{i=1}^2 \mu_{A_i}^l(e_2, \dot{e}_2)}{\sum_{l=1}^9 \min_{i=1}^2 \mu_{A_i}^l(e_2, \dot{e}_2)}$$

La méthode de Sugeno (ou Takagi-Sugeno-Kang) contient des entrées floues et une sortie sous forme d'une fonction scalaire (combinaison linéaire des entrées). Il est très adéquat pour les problèmes de contrôle, surtout pour les systèmes dynamiques non linéaires, et souvent utilisé pour les applications en temps réel, où le temps de calcul est important [91]

III.5. Résultats et discussions

Des tests numériques sont présentés dans cette section pour évaluer les performances des approches proposées. Toutes les simulations ont été réalisées en utilisant le simulateur MobileSim, qui est un logiciel de simulation d'« Adepte Mobile Robots » et de leurs environnements. L'Interface d'Application Avancée de Robotique « ARIA Advanced Robotics Interface for Application » et le logiciel Matlab ont été utilisés pour l'intégration des algorithmes de la commande proposés sur le robot. Enfin, on considère également que tous les tests ont été réalisés avec un temps d'échantillonnage $T_s = 0.045$ s.

III.5.1. Évaluation de l'algorithme de planification des trajectoires

Dans ce test, des différents cas ont été considérés pour clarifier les différents degrés de liberté de l'algorithme de planification de mouvement proposé. Ainsi, nous considérons la tâche de manipuler le robot de sa position initiale $r_A = [0 \ 0]$ à la position finale $r_B = [5 \ 5]$. L'ensemble de courbes représenté sur la figure III.4 confirme que les fonctions de planification de trajectoire (III.11-III.13) accomplissent les contraintes non holonomes (III.1-III.3) quelles que soient les orientations désirées du robot aux positions initiale et finale. La figure III.5 met en évidence un ensemble de différentes courbes obtenues avec différentes valeurs de k sous les mêmes tangentes ($\theta_i = \theta_f = 0$) aux points limites (r_A et r_B). Les principales caractéristiques des

différentes courbes planifiées sont récapitulées dans le tableau III.3. Avec une vitesse maximale fixe $v_{\max} = 0.3 \text{ m/s}$ pour le profil de mouvement $s(t)$, les deux dernières colonnes du tableau III.3, énumèrent le temps d'exécution des tâches planifiées ainsi que les vitesses angulaires maximales atteintes par le robot.

k	$L[m]$	$t_{\max} [s]$	$\omega_{\max} [rad / s]$
1	7,0892	45,3076	0,1922
3	7,1697	45,8109	0,1058
6	7,3563	46,9769	0,0927
10	7,7188	49,2424	0,1188
15	8,3827	53,3920	0,1932
20	9,3102	59,1888	0,3044

Tableau III.3 Les caractéristiques principales des différentes courbes planifiées

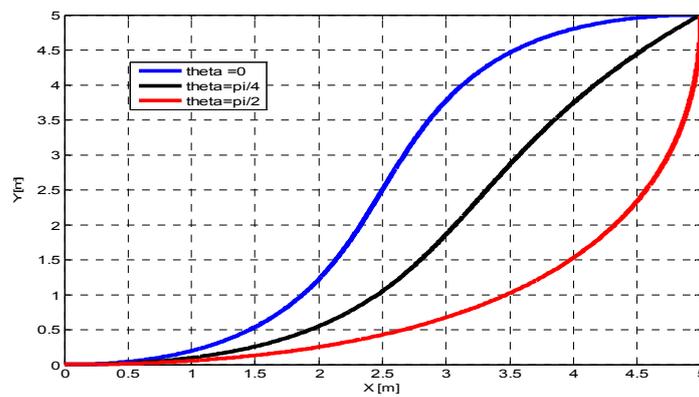


Figure III.4 Planification de la trajectoire avec différents cas de θ_f

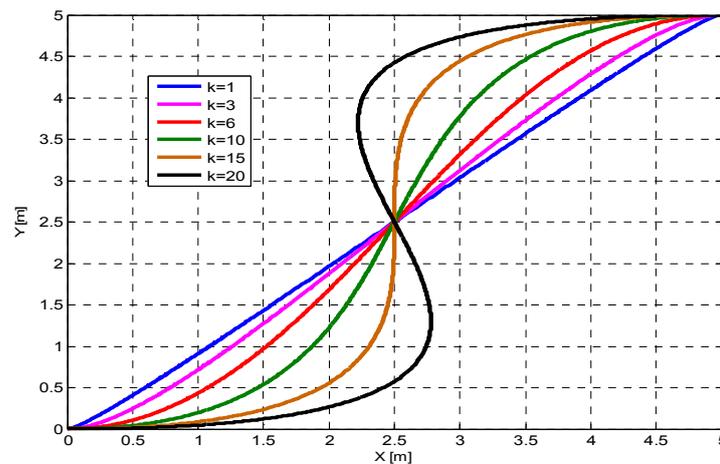


Figure III.5 Planification de la trajectoire avec différents cas de k

L'algorithme de planification proposé donne plusieurs degrés de liberté pour résoudre différents problèmes dans le domaine de la planification de mouvement pour les systèmes

robotiques tels que l'évitement d'obstacles, la minimisation de la longueur ou de la courbure du chemin dans la phase de planification du chemin et la minimisation du temps d'exécution, énergie ou secousse (jerk) dans l'étape de conception du profile de mouvement.

III.5.2. Résultats de la simulation sans erreur initiale et perturbation

Le but de ce test est d'évaluer les performances de la loi de commande par rétroaction platitude-flou proposée. Nous avons fixé la même tâche discutée ci-dessus avec $\theta_i = \theta_f = 0$ et $k = 10$. Les trajectoires de référence désirées dans ce cas sont illustrées sur la figure III.6. Elles sont obtenues en considérant le profil de mouvement représenté sur la figure III.7. La position initiale du robot est considérée comme cohérente avec la configuration initiale désirée dans ce test. Ensuite, deux contrôleurs ont été utilisés pour l'exécution des tâches planifiées:

1. Un contrôleur PD conventionnel avec des gains fixes tels que: $p_1 = q_1 = 0,75$, $p_2 = 1,2$; $q_2 = 1,3$. Ces paramètres sont fixés après plusieurs tests afin de minimiser l'erreur de suivi.
2. Un contrôleur flou-adaptatif basé sur le schéma proposé sur la figure III.2, où les paramètres de gain dans l'équation (III.27) sont ajustés automatiquement par le contrôleur flou défini dans l'équation (III.28).

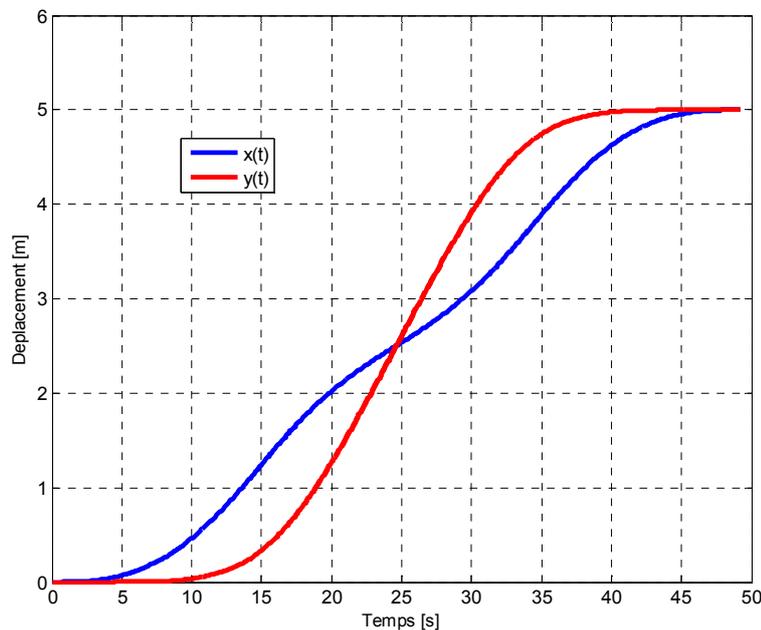


Figure III.6 Les coordonnées de Pioneer 3dx en fonction du temps: $x(t)$ et $y(t)$

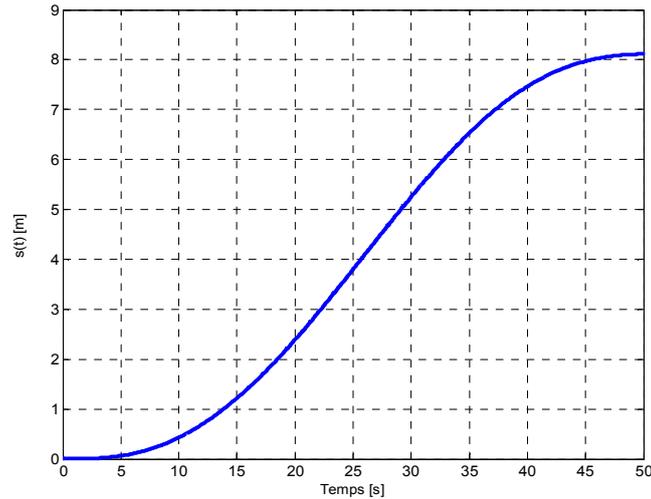


Figure III.7 Fonction de profil de mouvement $s(t)$

La figure III.8 montre l'évolution du robot le long du chemin désiré en utilisant les contrôleurs ci-dessus. Les normes cartésiennes des erreurs de suivi, sur x (Figure III.9.a) et sur y (Figure III.9.b), et les vitesses linéaires générées sont représentées sur les Figures III.9 et III.10, respectivement. On constate aussi que les résultats du contrôleur proposé sont meilleurs que le contrôleur PD classique compte tenu des valeurs moyennes de l'erreur qui sont données par : $rms_{fuzzy} = 5,2315 \times 10^{-3} m$, $rms_{PD} = 5,5772 \times 10^{-3} m$ pour les deux contrôleurs, respectivement. De plus, une vitesse maximale de $0,3 m/s$ a été maintenue pour le robot le long du chemin, et il est clairement montré sur la figure III.10 que la vitesse obtenue par le contrôleur proposé est plus proche de la vitesse désirée par rapport au contrôleur PD classique.

La figure III.11 montre comment les gains du contrôleur sont ajustés en temps réel.

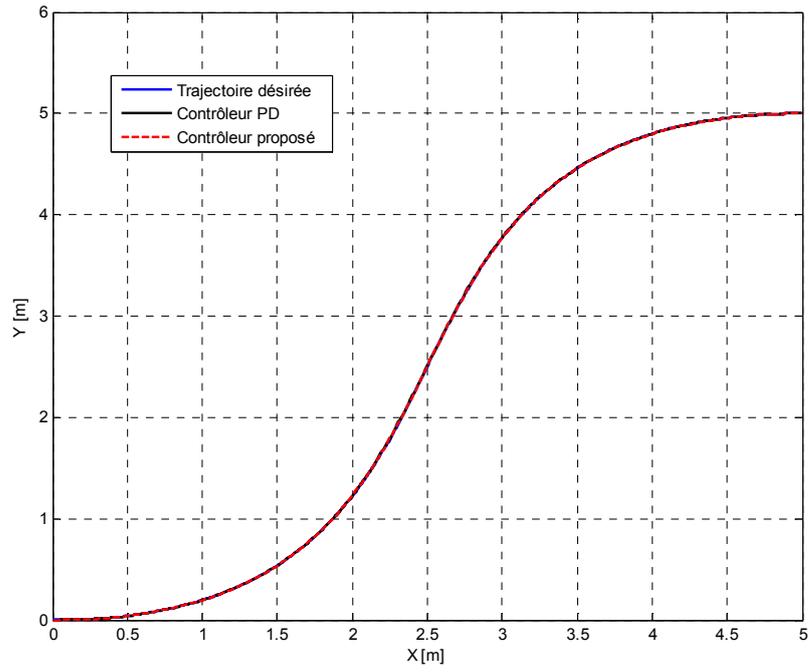
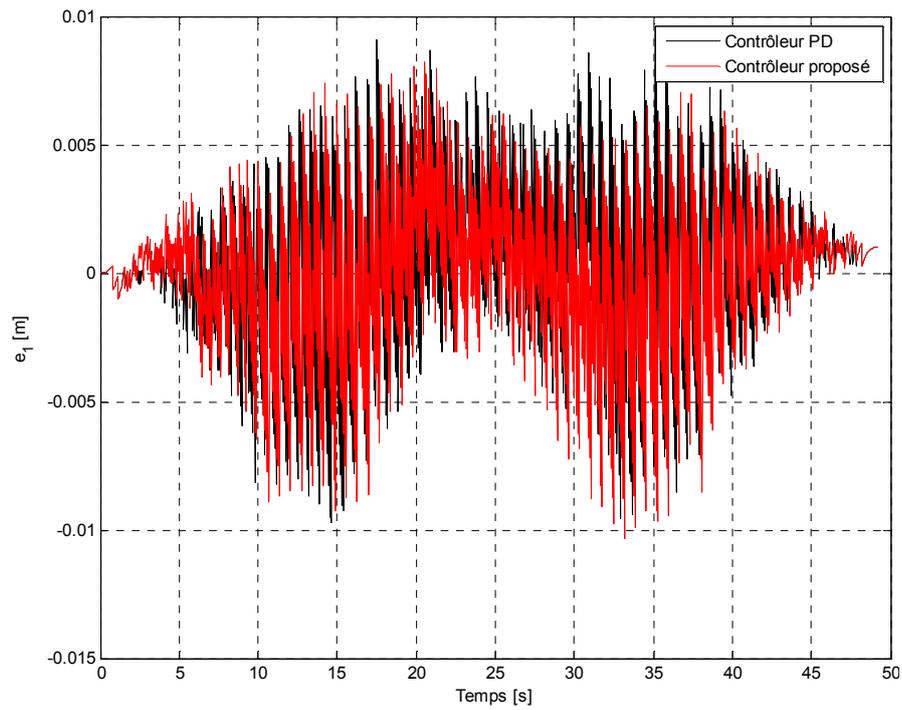
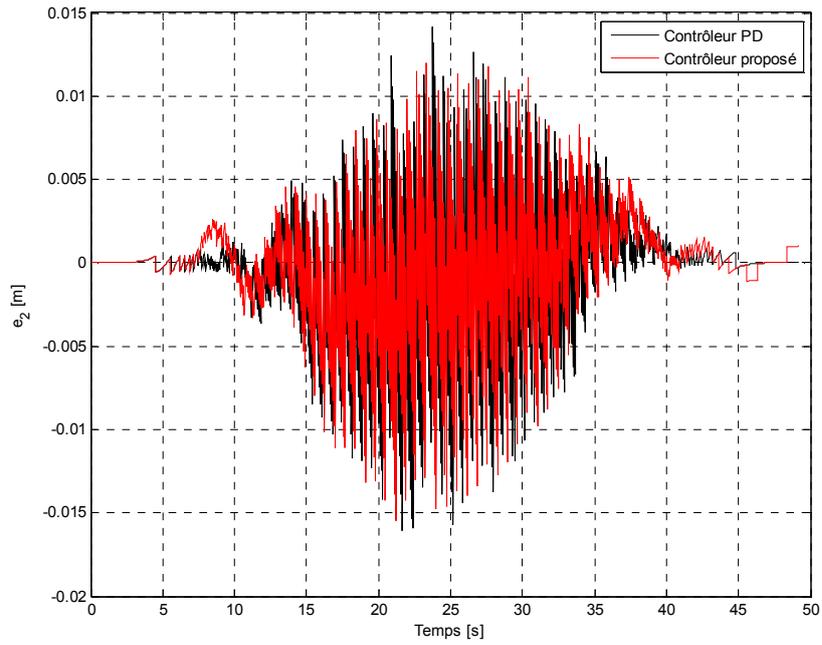


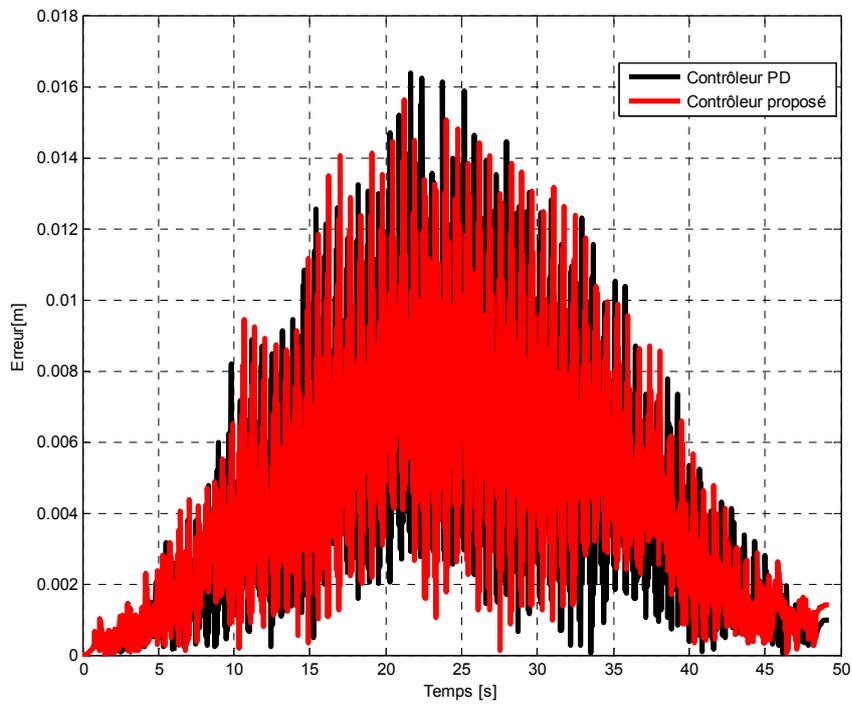
Figure III.8 Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée.



(a) Erreur de suivi sur x (e_1)



(b) Erreur de suivi sur y (e_2)



(c) Erreur de suivi $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2}$

Figure III.9 Erreur de suivi de trajectoire

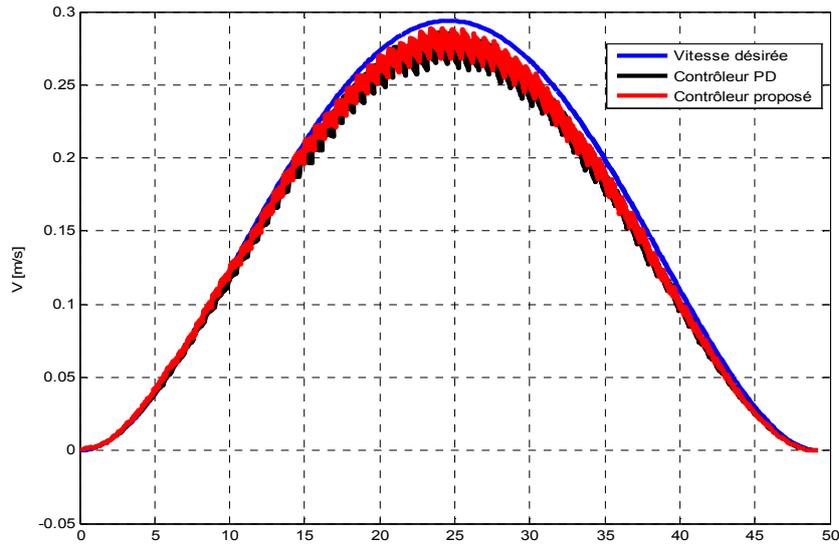


Figure III.10 Vitesse linéaire le long du chemin

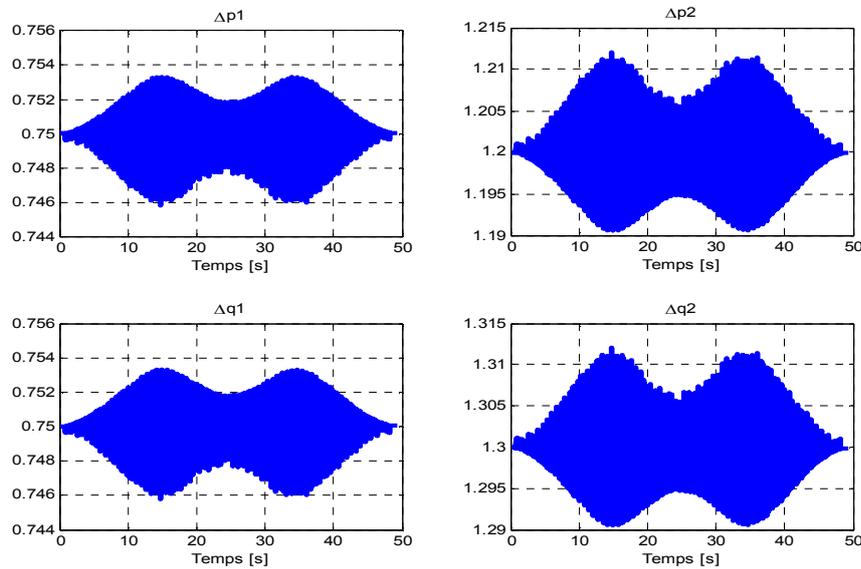


Figure III.11 Paramètre des gains du contrôleur proposé

III.5.3. Résultats de simulation avec différents paramètres

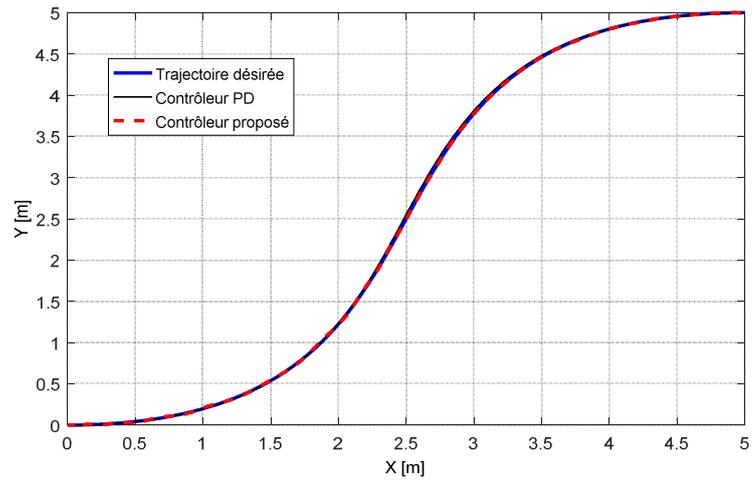
Comme le montre l'équation III.28, l'approche proposée est composée de deux parties, une partie donnée par des paramètres de gains fixes et une partie d'adaptation basée sur un contrôleur flou. Afin de clarifier l'impact de chaque partie sur les performances de la loi de commande, différents cas ont été proposés en considérant la partie des paramètres de gains fixes comme suit:

$$1^{\text{er}} \text{ cas : } p_1 = q_1 = 0,75, p_2 = q_2 = 0,1$$

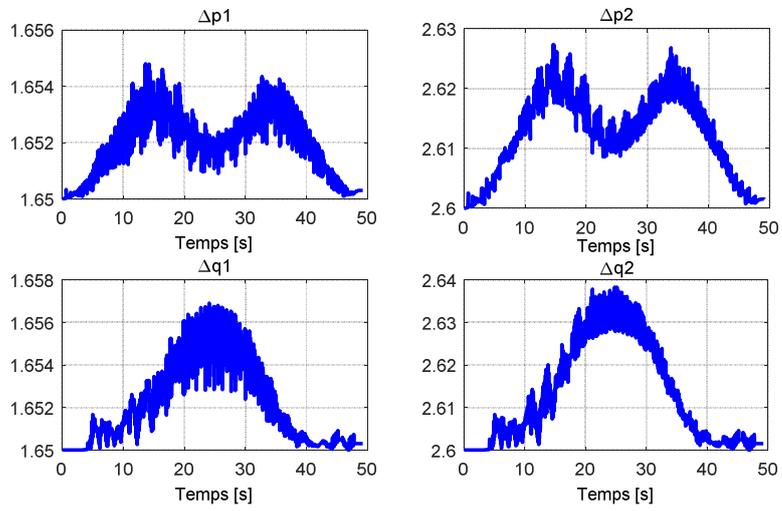
$$2^{\text{ème}} \text{ cas : } p_1 = q_1 = 0,35, p_2 = q_2 = 0,05$$

$$3^{\text{ème}} \text{ cas : } p_1 = q_1 = p_2 = q_2 = 0$$

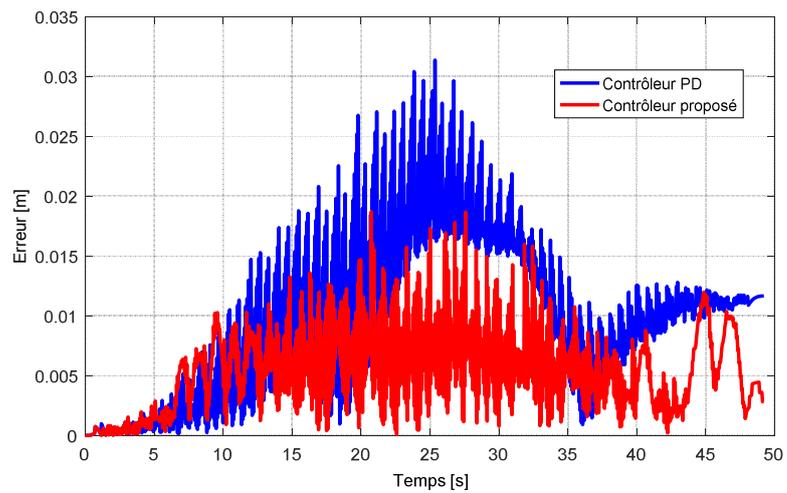
Le comportement du robot mobile sous le contrôleur PD et l'approche proposée est donné sur les figures III.12, III.13 et III.14.



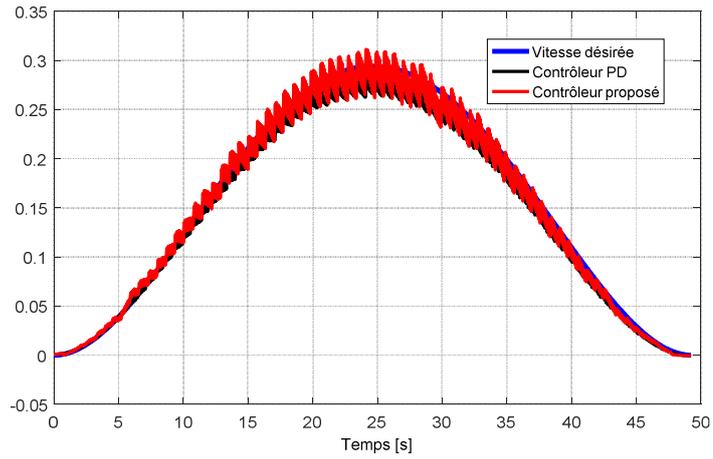
(a) Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée



(b) Paramètres des gains du contrôleur proposé

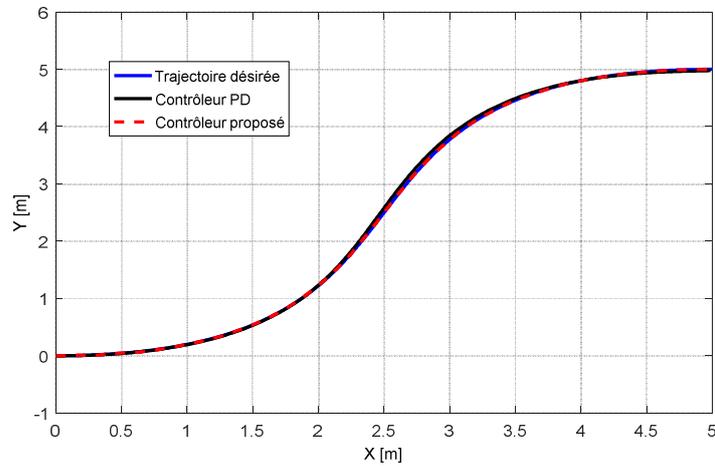


(c) Erreur de suivi

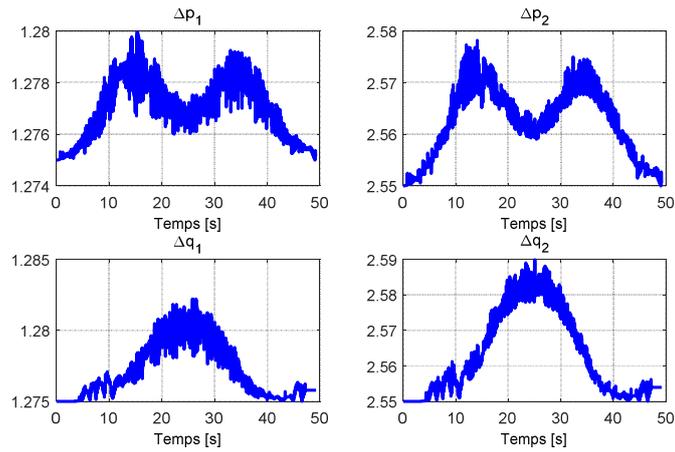


(d) Vitesse linéaire le long du chemin

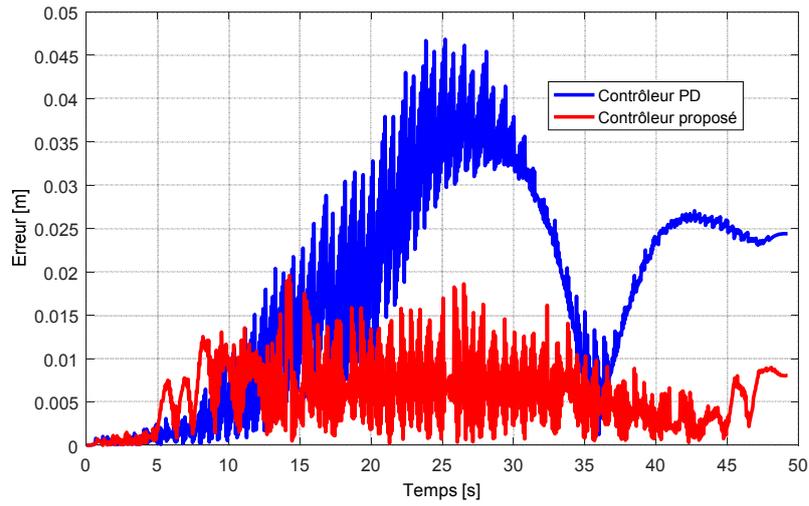
Figure III.12 Résultats de la simulation avec $p_1 = q_1 = 0,75$, $p_2 = q_2 = 0,1$



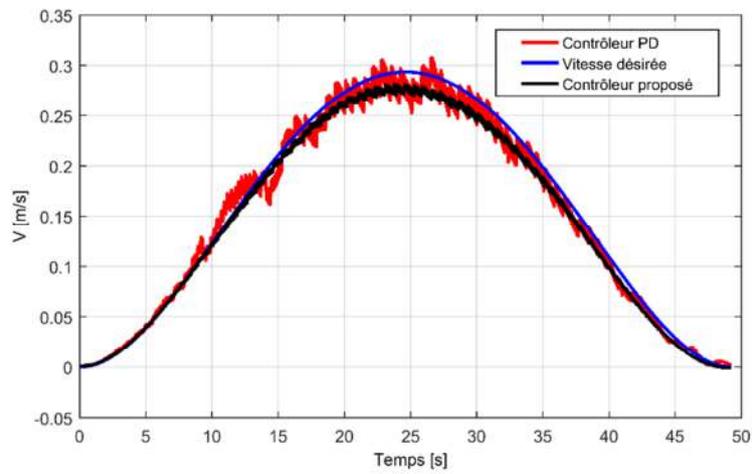
(a) Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée



(b) Paramètres des gains du contrôleur proposé

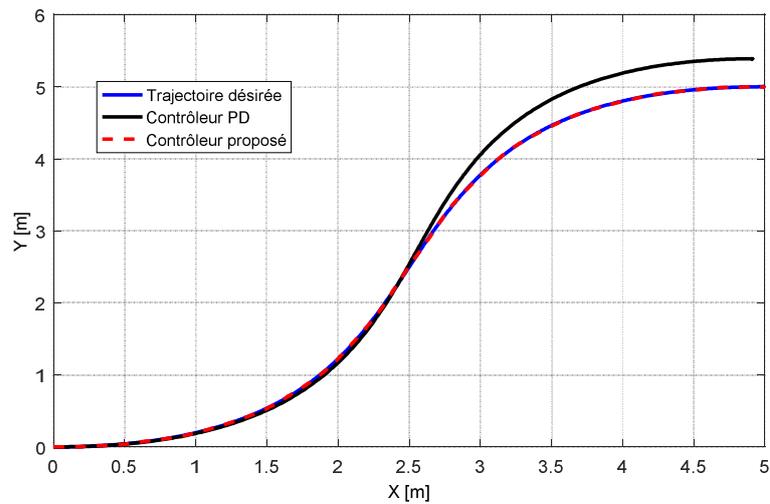


(c) Erreur de suivi

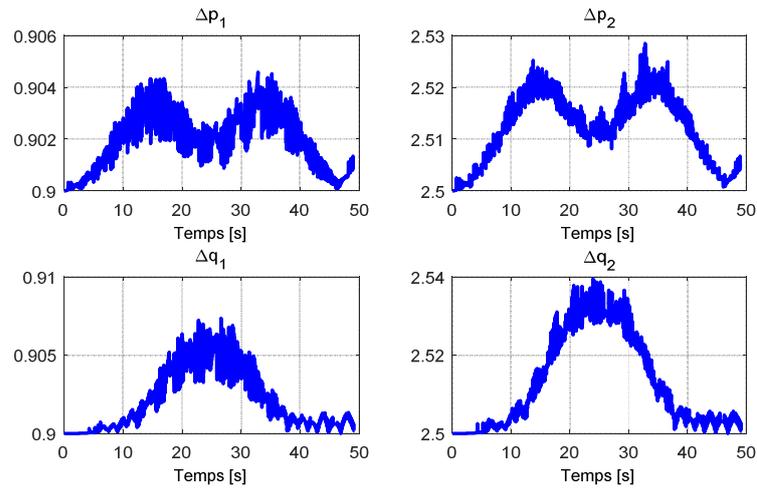


(d) Vitesse linéaire le long du chemin

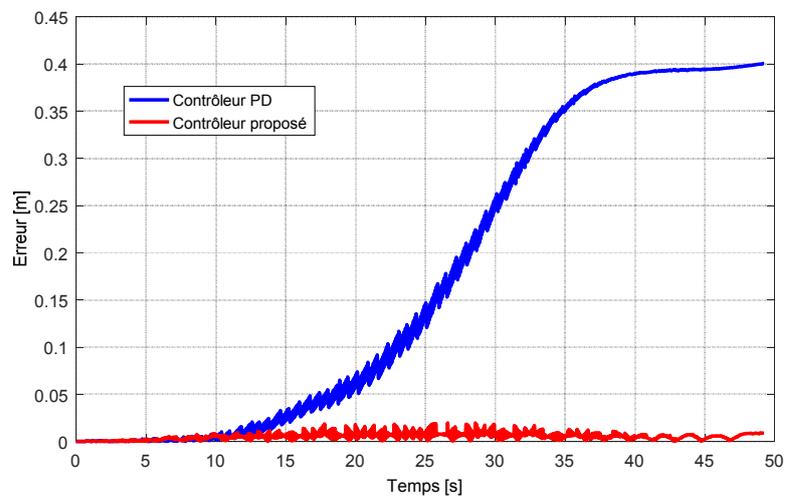
Figure III.13 Résultats de simulation avec $p_1 = q_1 = 0,35$, $p_2 = q_2 = 0,05$



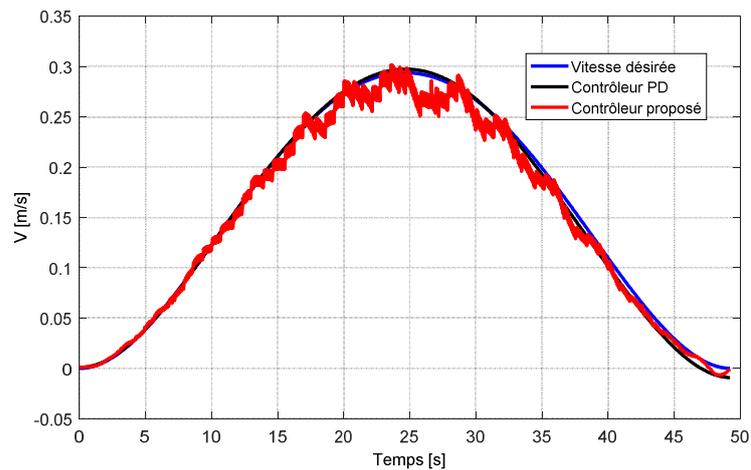
(a) Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée



(b) Paramètres des gains du contrôleur proposé



(c) Erreur de suivi



(d) Vitesse linéaire le long du chemin

Figure III.14 Résultats de la simulation avec $p_1 = q_1 = p_2 = q_2 = 0$

Le tableau III.4 récapitule les performances des deux contrôleurs en considérant différents cas:

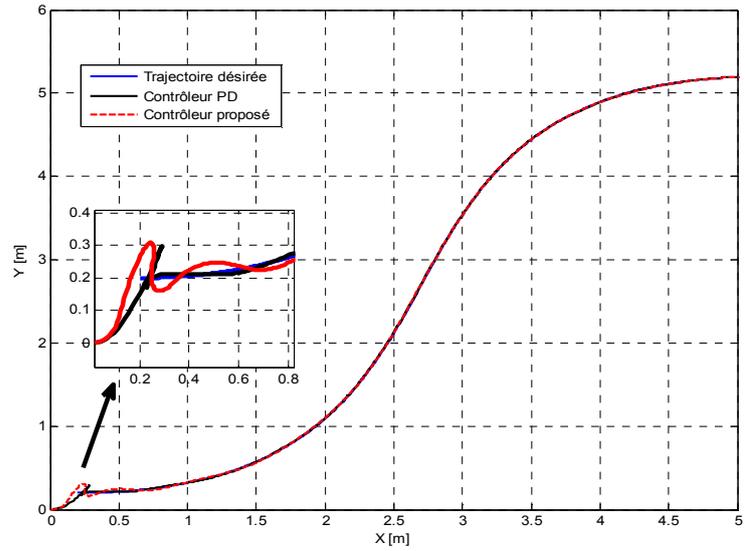
<i>cas</i>	RMS_{PD}	RMS_{Fuzzy}
1	0,0124	0,007
2	0,0220	0,007
3	0,2411	0,007

Tableau III.4 *Les performances du contrôleur*

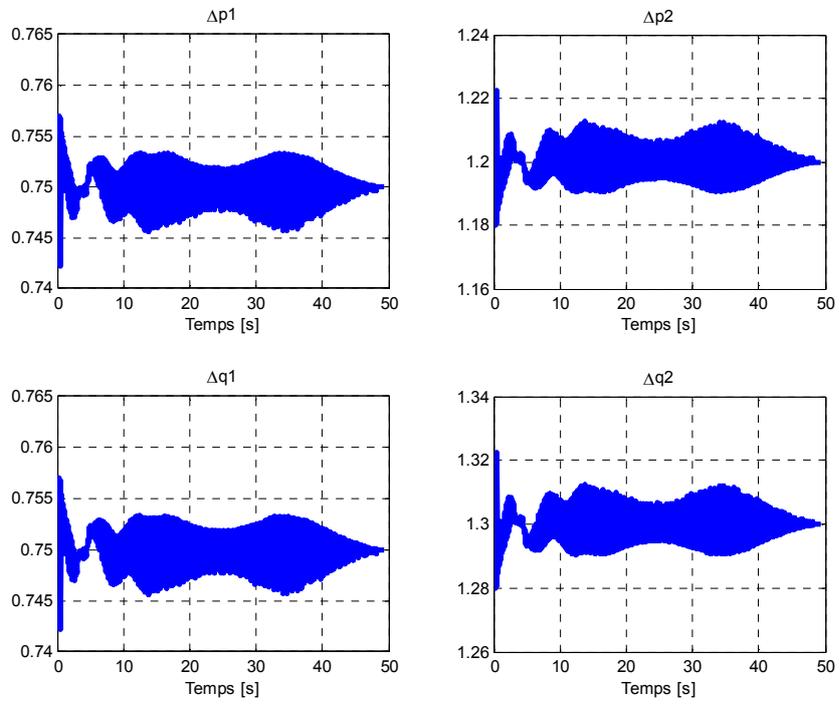
Par une analyse des résultats présentés, on peut clairement constater l'efficacité du contrôleur flou proposé pour assurer les meilleures performances en termes de la précision de suivi, même dans le cas où le contrôleur flou est défini sans valeur d'offset (troisième cas). On peut également noter la nature bornée (limitée) qui caractérise les sorties floues du contrôleur (gains adaptatifs) dans tous les cas. De plus et par rapport au test précédent, nous pouvons également observer que l'initialisation optimale de la partie à paramètre de gain fixe peut améliorer les performances du système en termes de la précision de suivi et de régularité des vitesses de contrôle générées.

III.5.4. Résultats de simulation avec une erreur initiale

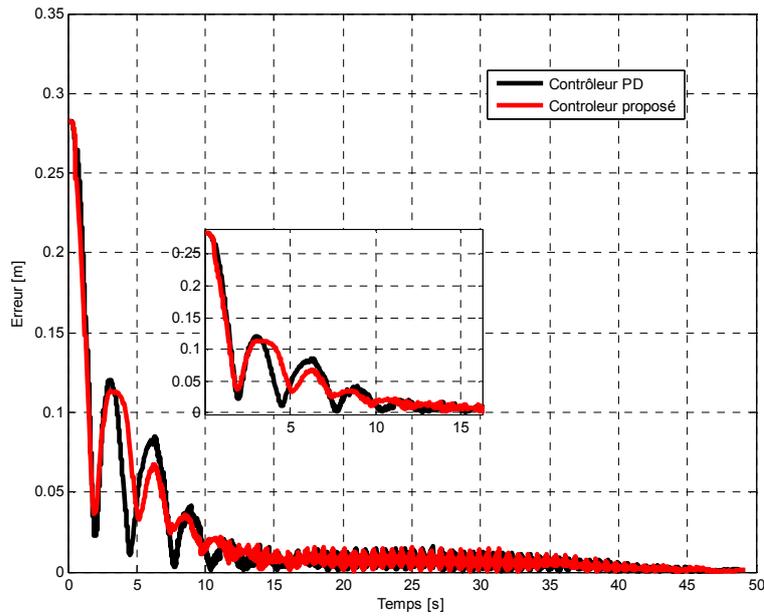
Dans ce test, nous considérerons le cas d'incohérences entre la configuration initiale et désirée du robot, c'est-à-dire que nous supposons les erreurs initiales suivantes : $e_1 = e_2 = 0,02m$ sur les coordonnées x et y . Une comparaison du comportement du robot, sous les contrôleurs décrits ci-dessus, est illustrée à la figure III.15. En plus, le comportement présenté met en évidence des avantages de la technique proposée, principalement la convergence vers les trajectoires désirées dans la phase transitoire. La figure III.15.c montre que le temps de réponse avec le contrôleur flou est plus rapide qu'avec le contrôleur PD conventionnel. De plus, et à partir des figures III.15.a,d on peut noter l'efficacité de l'approche proposée dans l'élimination des mouvements de recul du robot, où seules des vitesses positives sont générées par l'approche proposée pour compenser l'incohérence initiale, contrairement au contrôleur PD classique qui est caractérisé par des vitesses négatives pendant la phase de convergence transitoire.



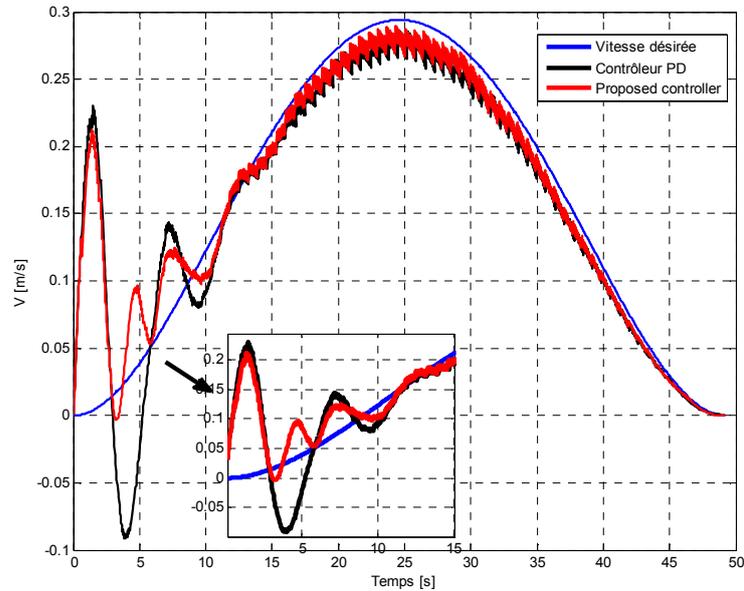
(a) Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée



(b) Paramètres des gains du contrôleur proposé



(c) Erreur de suivi

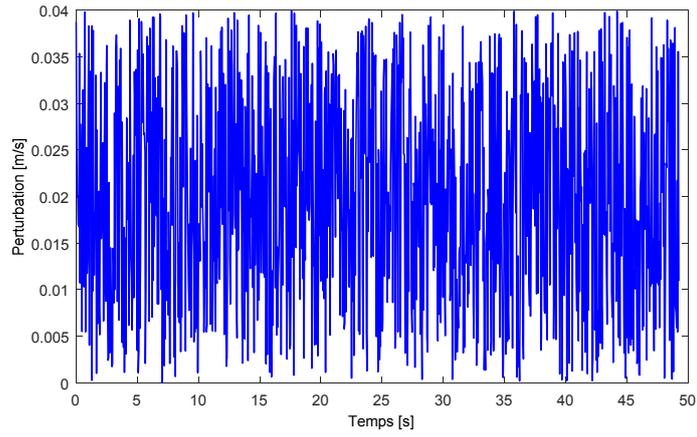


(d) Vitesse linéaire le long du chemin

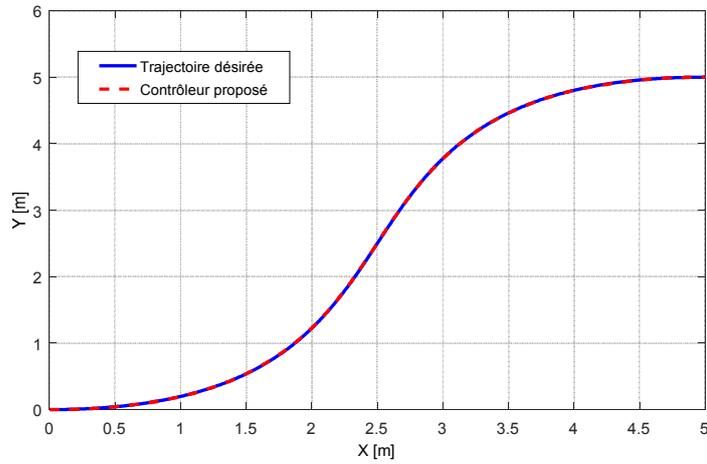
Figure III.15 Résultats de simulation avec une erreur initiale $e_1 = e_2 = 0,02m$

III.5.5. Résultats de simulation avec perturbation

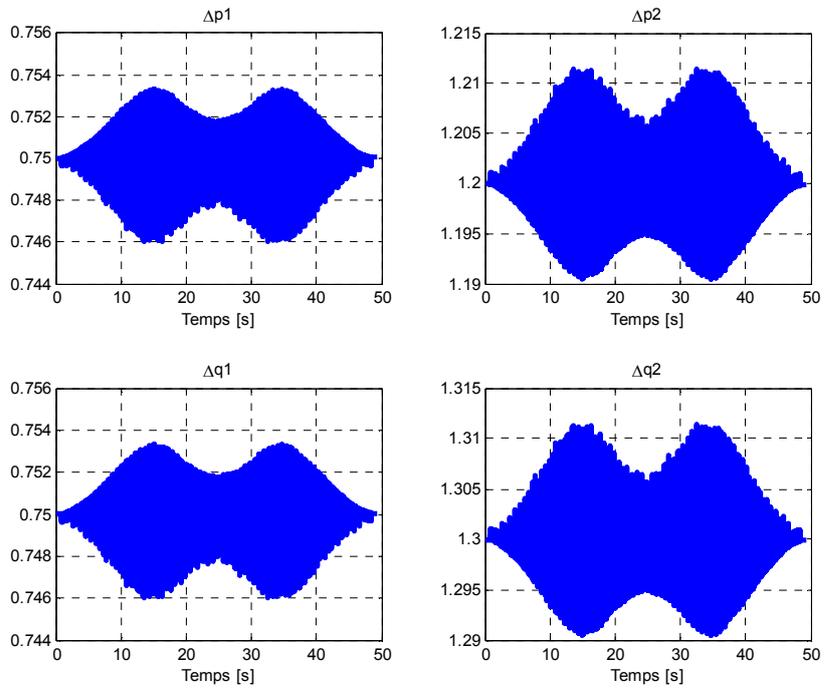
Ce test vise à évaluer le comportement du contrôleur en tenant compte les effets des perturbations externes. Ainsi, on a supposé que l'entrée de la vitesse du système est soumise à un signal externe aléatoire avec un maximum de 0.04 m/s (Figure III.16.a). Les résultats simulés sont présentés sur les figures III.16.b.c.d.e qui confirment à nouveau l'efficacité de l'approche proposée en termes de précision de suivi, de délimitation des gains de contrôle et de robustesse.



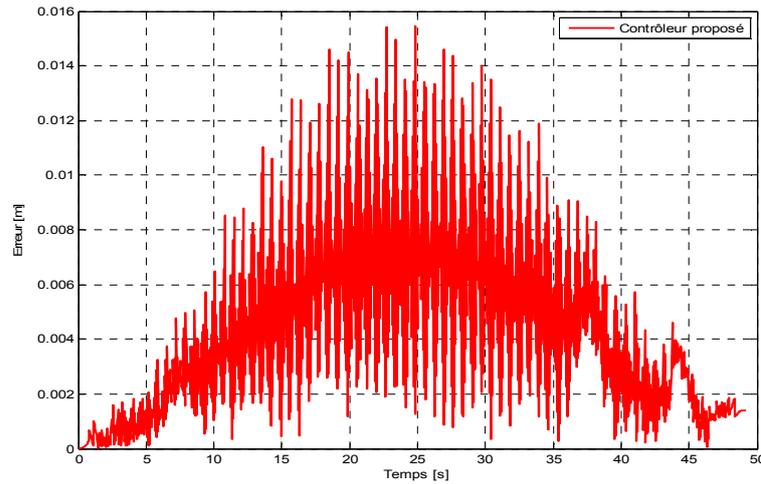
(a) Perturbation



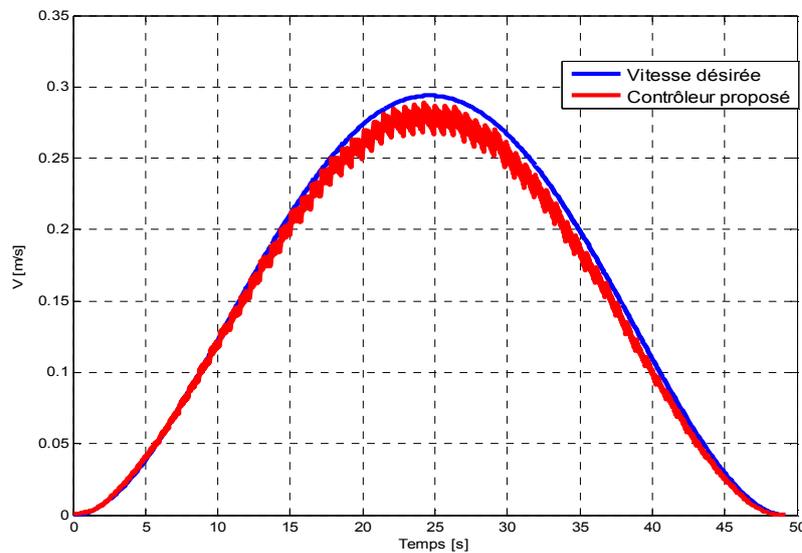
(b) Mouvement du robot le long de la trajectoire désirée



(c) Paramètres des gains du contrôleur proposé



(d) Erreur de suivi



(e) Vitesse linéaire le long du chemin

Figure III.16 Résultats de simulation avec perturbation d'amplitude 0,04m/s

III.6. Conclusion

Ce chapitre présente une approche globale de la manipulation de robots mobiles à roues avec des contraintes non holonomes. Tout d'abord, une approche de planification découplée chemin-trajectoire est présentée pour la planification de mouvement sûre et adaptative des tâches du robot. Ensuite, une approche combinée d'un concept de platitude- floue a été introduite pour garantir l'exécution précise des trajectoires planifiées sous différentes considérations d'incertitudes. Les résultats présentés ont prouvé l'efficacité de la méthode proposée avec et sans erreur initiale ainsi qu'avec et sans perturbations.

CHAPITRE IV

COMMANDE DU MANIPULATEUR AVEC L'APPROCHE PLATITUDE FLOUE

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, la stratégie de contrôle qui se repose sur le couplage entre deux techniques qui sont la platitude différentielle et la logique floue est proposée pour un manipulateur mobile à roue (MMR) non holonome. L'objectif est de construire un nouveau contrôleur capable de contrôler une classe de manipulateurs mobiles plats de haute performance. La technique de platitude est exploitée pour éliminer les effets de non-linéarité et pour assurer le calcul de trajectoires optimales sans l'intégration des équations différentielles de sorte que toutes les trajectoires du système soient polynomiales. En outre, le contrôleur flou est utilisé pour régler les paramètres du contrôleur de platitude en temps réel. De plus, le logiciel MobileSim est utilisé pour simuler le comportement du robot en réalité virtuelle. La platitude est approuvée par le modèle du manipulateur mobile et une trajectoire polynomiale a été générée dans un espace de sortie plate pour être suivie par le robot.

IV.2. Les manipulateurs mobiles à roues

Récemment, les manipulateurs mobiles à roues (MMR) ont été largement étudiés et exploités pour faciliter les tâches humaines. Le MMR peut être utilisé dans plusieurs domaines tels que le domaine médical (robot chirurgical), l'exploration spatiale, les opérations militaires et le domaine industriel. De tels systèmes robotiques sont composés d'un bras manipulateur fixé sur un robot mobile qui prolonge l'espace de travail du bras robotique [92] [93]

En raison de ses applications pratiques, comme dans [92] un manipulateur mobile téléopéré est utilisé pour rechercher et sauver une victime dans la zone sinistrée, ce type de robot attire une grande attention de plusieurs chercheurs ces dernières années. Wei et coll. [94] ont proposé un nouveau contrôleur adaptatif pour s'assurer que les états des systèmes en boucle fermée suivent asymptotiquement les trajectoires désirées tandis que la force de contrainte reste limitée par le réglage des paramètres de conception. Chen et coll. [95] utilisent un contrôleur LQR pour stabiliser un manipulateur mobile à deux roues en utilisant la rétroaction du centre de gravité. Youcef et coll. [96] utilisent le champ de potentiel artificiel pour générer un chemin sans collision pour un manipulateur mobile dans un environnement complexe et connu avec des obstacles. Cependant, le principal défi imposé par ces techniques est l'erreur dynamique et le long temps de

réponse.

Dans ce contexte, la technique de platitude différentielle est une propriété structurelle d'une classe de systèmes dynamiques non linéaires [86]. Certains chercheurs exploitent cette théorie pour contrôler un tel système. Elisha et coll. [97] ont synchronisé le contrôle de nombreux robots manipulateurs flexibles en utilisant la platitude différentielle pour simplifier les tâches de suivi de trajectoire. Un schéma de technique de commande de rejet de perturbation active robuste basé sur la platitude est proposé pour le problème de stabilisation et de contrôle de suivi du pendule inversé du chariot où l'approche de l'équivalence de Lie-Bäcklund et de la platitude est utilisée [98]. Par ailleurs, la méthode de contrôle de suivi pour le mouvement latéral d'un véhicule terrestre autonome est proposée. Cette méthode est basée sur le schéma de contrôle actif du rejet des perturbations et la théorie de la platitude différentielle [99]. Cependant, le principal inconvénient est que toutes ces méthodes n'ont pas pris en compte la manière de définir les paramètres du contrôleur. Dans ce chapitre, un nouvel algorithme de contrôle en temps réel du manipulateur mobile à roue non holonome est proposé.

IV.3. Modélisation cinématique du manipulateur mobile à roues (MMR)

Le MMR considéré est représenté sur la figure IV.1. Il est composé d'un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile non-holonome à deux roues différentielles. Les coordonnées généralisées du MMR sont données par $q_m = [q_b, q_a] = [x, y, \theta, \theta_1, \theta_2]$, où $q_b = [x, y, \theta]$ décrit les coordonnées de la base mobile et $q_a = [\theta_1, \theta_2]$ décrit la position angulaire du bras manipulateur, les lettres souscrites b et a désignent la base mobile et le bras manipulateur respectivement.

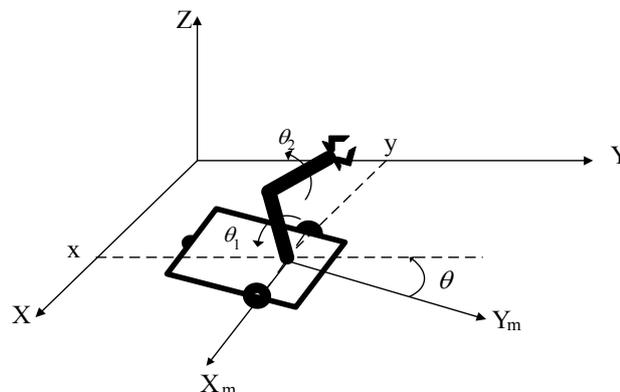


Figure IV.1 Le modèle simplifié du MMR.

Le modèle mathématique du MMR incluant les contraintes non holonomes de la base mobile est donné par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

où v et ω sont les vitesses linéaire et angulaire de la base mobile respectivement, $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\theta}_2$ sont les vitesses d'articulation du bras manipulateur.

Le modèle décrit par l'équation (IV.1) peut être écrit sous forme matricielle comme:

$$\dot{q}_m = \begin{bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_b & 0_{3 \times 2} \\ 0 & I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_a \end{bmatrix} = J_m u_m \quad (\text{IV.2})$$

$$\dot{q}_m = \begin{bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_b & 0_{3 \times 2} \\ 0 & I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_a \end{bmatrix} = J_m u_m \quad (\text{IV.3})$$

dans lequel $I_{2 \times 2}$ et $0_{3 \times 2}$ sont des matrices d'identité et de zéro respectivement. \dot{q}_a et \dot{q}_b sont données par les équations suivantes:

$$\dot{q}_b = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J_b u_b \quad (\text{IV.4})$$

$$\dot{q}_a = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = I_2 u_a \quad (\text{IV.5})$$

Les équations (IV.3) et (IV.4) donnent les modèles cinématique de la base mobile et du bras manipulateur respectivement.

$u_m^T = [u_b \ u_a]^T$ est le vecteur de commande où: $u_b^T = [v \ \omega]^T$ et $u_a^T = [u_1 \ u_2]^T = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$.

IV.4. Concept de la commande du MMR

IV.4.1. Principe de fonctionnement de la platitude pour le MMR

Le système (IV.1) est composé de deux sous-systèmes, où le 1^{er} sous système, la plate-forme mobile, est plat comme il est montré dans la section III.4 avec les sorties plates choisies :

$$F_b^T = [F_1, F_2] = [x, y]$$

Et du fait que la commande ne s'apparaisse que dans la deuxième dérivée, comme il est montré sur l'équation III.21 du chapitre précédent donné par :

$$\ddot{F}_b = \begin{bmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -v \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & v \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \omega \end{bmatrix}$$

alors $u_b = [z_1, \omega]$ est l'entrée modifiée du système, où $z_1 = \dot{v}$.

Et pour le 2ème sous système, le bras manipulateur, la sortie plate peut être choisie comme suit:

$$F_a^T = [F_3, F_4] = q_a^T = [\theta_1, \theta_2] \quad (\text{IV.6})$$

On prend la dérivée temporelle de cette sortie plate:

$$\dot{F}_a^T = [\dot{F}_3, \dot{F}_4] = \dot{q}_a^T = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2] \quad (\text{IV.7})$$

Selon les équations (III.21), (III.22), (IV.5) et (IV.6), la variable d'état et les entrées du système peuvent être formulées par la sortie plate et leurs dérivés comme il est présenté dans le tableau suivant:

Les états et les entrées du système	Les sorties plates
$x = F_1, y = F_2$ $\dot{x} = \dot{F}_1, \dot{y} = \dot{F}_2$ $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_1} \right)$	$F_1 = x, F_2 = y$ $\dot{F}_1 = \dot{x}, \dot{F}_2 = \dot{y}$
$v = \sqrt{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2}, \dot{v} = \frac{\dot{F}_1 \ddot{F}_2 + \dot{F}_2 \ddot{F}_1}{\sqrt{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2}}$ $\dot{\theta} = \omega = \frac{\dot{F}_1 \ddot{F}_2 - \dot{F}_2 \ddot{F}_1}{\dot{F}_1^2 + \dot{F}_2^2}$	$\dot{F}_1 = \dot{x} = v \cos(\theta)$ $\dot{F}_2 = \dot{y} = v \sin(\theta)$ $\ddot{F}_1 = \dot{v} \cos(\theta) - v \omega \sin(\theta)$ $\ddot{F}_2 = \dot{v} \sin(\theta) + v \omega \cos(\theta)$
$\theta_1 = F_3, \theta_2 = F_4$ $\dot{\theta}_1 = w_1 = \dot{F}_3, \dot{\theta}_2 = w_2 = \dot{F}_4$	$F_3 = \theta_1, F_4 = \theta_2$ $\dot{F}_3 = \dot{\theta}_1 = w_1, \dot{F}_4 = \dot{\theta}_2 = w_2$

Tableau IV.1 La relation entre les sorties plates et l'espace d'état (diffeomorphisme) du MMR.

Sur la base de la définition des systèmes plats et du tableau IV.1, nous pouvons déduire que le modèle MMR donné en IV.1 est différentiellement plat.

Si on définit le vecteur d'entrée de la commande $u = [z_1, \omega, w_1, w_2]^T$ comme :

$$\begin{cases} z_1 = u_1 \cos(\theta) + u_2 \sin(\theta), \\ v = \int z_1 dt, \\ \omega = \frac{u_2 \cos(\theta) - u_1 \sin(\theta)}{v}, \\ \dot{\theta}_1 = w_1, \\ \dot{\theta}_2 = w_2. \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

où u_1, u_2, u_3 et u_4 sont des nouvelles entrées de commande à concevoir.

Le système IV.1 prend la forme :

$$\begin{bmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \\ \dot{F}_3 \\ \dot{F}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

Il est noté que ce changement des états du système et des entrées de commande rend le problème de conception d'un contrôleur non linéaire compliqué, un problème de conception simple pour un système linéaire composé de quatre sous-systèmes découplés.

Une fois les trajectoires de référence planifiées, il est nécessaire d'identifier les entrées de commande qui forcent le robot à suivre ces trajectoires malgré les perturbations externes et les incertitudes du modèle.

Pour le contrôle des mouvements du bras manipulateurs, on a proposé une commande de la forme :

$$\begin{cases} u_3 = \frac{dw_1}{dt}, u_4 = \frac{dw_2}{dt} \\ w_1 = \int u_3 dt, w_2 = \int u_4 dt, \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Avec $[u_3 \ u_4]$ représentent des nouvelles entrées de commande pour le bras.

On considère le vecteur d'erreur de suivi défini par:

$$e_i = F_{ci} - F_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

IV.4.2. Planification des trajectoires

Considérons le déplacement du robot sera entre deux configurations $A = [x_A, y_A, \theta_A, \theta_{1A}, \theta_{2A}]$ et $B = [x_B, y_B, \theta_B, \theta_{1B}, \theta_{2B}]$ dans un temps fini t_f . Compte tenu des conditions terminales d'une telle tâche et sur la base de la propriété de la technique platitude sur le MMR, les conditions initiales pour les états des sorties plates et leurs dérivées à travers le difféomorphisme du système peuvent être donné comme il est indiqué sur le tableau IV.1 suivant:

Les conditions initiales pour les variables d'états	Les conditions terminales pour les sorties plates
$x(0) = x_A, y(0) = y_A$ $\theta(0) = \theta_A$ $\theta_1(0) = \theta_{1A}, \theta_2(0) = \theta_{2A}$	$F_1(0) = x(0)$ $F_2(0) = y(0)$ $F_3(0) = \theta_1(0)$ $F_4(0) = \theta_2(0)$
$x(t_f) = x_B, y(t_f) = y_B$ $\theta(t_f) = \theta_B$ $\theta_1(t_f) = \theta_{1B}, \theta_2(t_f) = \theta_{2B}$	$F_1(t_f) = x(t_f)$ $F_2(t_f) = y(t_f)$ $F_3(t_f) = \theta_1(t_f)$ $F_4(t_f) = \theta_2(t_f)$

Tableau IV.2 Les conditions terminales des sorties plates.

Une représentation polynomiale des trajectoires désirées du robot est choisie pour fournir un mouvement approprié du MMR. Malgré sa simplicité, une telle représentation fournit des entrées de commande pour le robot [84], elle est donnée comme suit:

$$\begin{aligned}
 F_1^d(t) &= a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\
 F_2^d(t) &= b_7 t^7 + b_6 t^6 + b_5 t^5 + b_4 t^4 + b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \\
 F_3^d(t) &= c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \\
 F_4^d(t) &= d_3 t^3 + d_2 t^2 + d_1 t + d_0
 \end{aligned} \tag{IV.11}$$

$$t \in [0, t_f]$$

Les coefficients, $a_i (i=0...5)$ $b_j (j=0...7)$ $c_k (k=0...3)$, et $d_l (l=0...3)$ sont déterminés en utilisant les conditions aux limites données dans le tableau IV.2.

En tenant compte des limites physiques de la vitesse linéaire maximale $v \leq v_{\max}$ de la plateforme mobile, une estimation du temps d'exécution final minimal peut être trouvée comme [13]:

$$t_f = 15 \frac{D}{v_{\max}} \tag{IV.12}$$

où D représente la distance euclidienne entre les configurations de départ du robot et les configurations désirées:

$$D = \sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2} \tag{IV.13}$$

Ainsi qu'on note que le temps d'exécution T pour le bras manipulateur doit être synchronisé avec les mouvements du chariot mobile. Il est également nécessaire de garantir que toutes les limites physiques du système sont respectées. Ces contraintes sont données sous la forme :

- *Les positions angulaires des articulations*

$$\begin{aligned}\theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max} \\ \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max}\end{aligned}\tag{IV.14}$$

- *Les vitesses angulaires des articulations*

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{1\min} &\leq \dot{\theta}_1 \leq \dot{\theta}_{1\max} \\ \dot{\theta}_{2\min} &\leq \dot{\theta}_2 \leq \dot{\theta}_{2\max}\end{aligned}\tag{IV.15}$$

Etant donné des conditions initiales de la tâche spécifiée et des limites physiques du MMR, c'est-à-dire la vitesse angulaire de chaque roue et les limites pour chaque articulation, et en se basant sur sa propriété de platitude, les trajectoires désirées peuvent être planifiées soit dans l'espace cartésien, soit dans l'espace plat du système (Tableau IV.2).

$$\begin{aligned}F(t) &= [F_1(t), F_2(t), F_3(t), F_4(t)]^T \\ &= [x(t), y(t), \theta_3(t), \theta_4(t)]^T \\ &= F(s(t)) = F(s) \circ s(t)\end{aligned}$$

IV.4.3. Conception du contrôleur

Le système (IV.1) peut être régi dans un espace de sortie plate en utilisant les équations linéaires indépendantes suivantes:

$$\begin{aligned}\ddot{F}_1 &= \eta_1 \\ \ddot{F}_2 &= \eta_2 \\ \dot{F}_3 &= \eta_3 \\ \dot{F}_4 &= \eta_4\end{aligned}\tag{IV.16}$$

Lorsque les entrées $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$ sont sélectionnées pour atteindre la stabilité exponentielle du système, comme suit:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \ddot{F}_1^d + k_1(\dot{F}_1^d - \dot{F}_1) + k_2(F_1^d - F_1) = \ddot{F}_1^d + k_1\dot{e}_1 + k_2e_1 \\ \eta_2 &= \ddot{F}_2^d + j_1(\dot{F}_2^d - \dot{F}_2) + j_2(F_2^d - F_2) = \ddot{F}_2^d + j_1\dot{e}_2 + j_2e_2 \\ \eta_3 &= \dot{F}_3^d + b(F_3^d - F_3) = \dot{F}_3^d + be_3 \\ \eta_4 &= \dot{F}_4^d + d(F_4^d - F_4) = \dot{F}_4^d + de_4\end{aligned}\tag{IV.17}$$

où $F_1^d, F_2^d, F_3^d, F_4^d$ sont les trajectoires désirées dans l'espace des sorties plates et sont définies comme dans (IV.11).

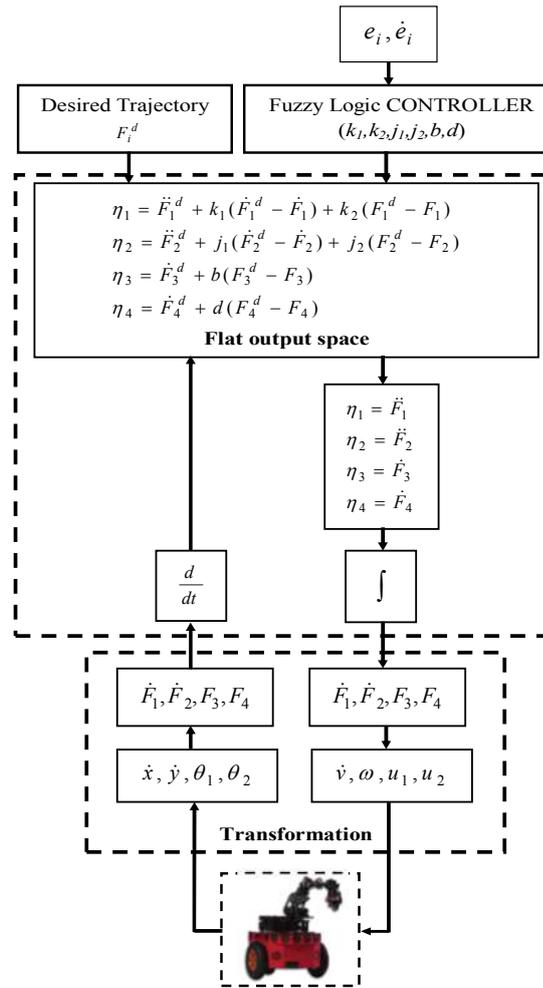


Figure IV.2 Bloc diagramme synoptique du contrôleur proposé

La substitution de (IV.16) dans (IV.17) donne l'erreur dynamique du système en boucle fermée exprimée comme:

$$\begin{aligned}
 \ddot{e}_1 + k_1\dot{e}_1 + k_2e_1 &= 0 \\
 \ddot{e}_2 + j_1\dot{e}_2 + j_2e_2 &= 0 \\
 \ddot{e}_3 + be_3 &= 0 \\
 \ddot{e}_4 + de_4 &= 0
 \end{aligned} \tag{IV.18}$$

Le contrôleur flou représenté sur la figure IV.2, avec e et \dot{e} les entrées du contrôleur, est utilisé pour un ajustement en temps réel des paramètres $(k_1, k_2, j_1, j_2, b, d)$. Les fonctions d'appartenance d'un tel contrôleur sont représentées sur la figure IV.3 et la base des règles est donnée dans le tableau IV.4.

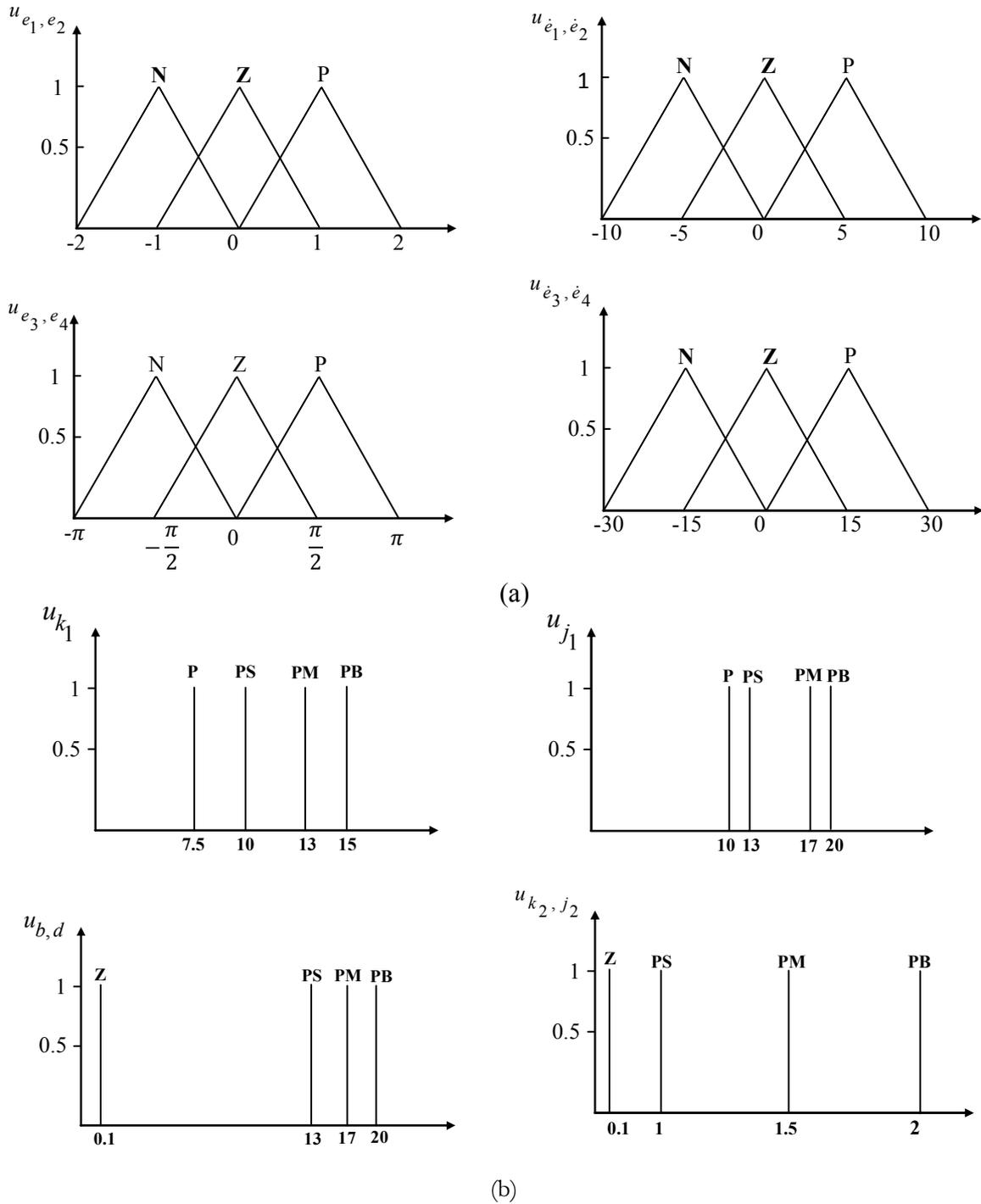


Figure IV.3 Les fonctions d'appartenance du contrôleur flou : (a) les variables d'entrées avec : **N** est négatif, **Z** est zéro et **P** est positif. (b) les variables de sorties avec **Z** est zéro, **P** est positif, **PS** est positif petit, **PM** est positif moyen et **PB** est positif grand

$\begin{matrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \end{matrix}$	N	Z	P	$\begin{matrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \end{matrix}$	N	Z	P
N	PB/PB	PS/PM	PS/Z	N	PB/PB	PS/PM	PS/Z
Z	PM/PM	P/Z	PM/PM	Z	PM/PM	P/Z	PM/PM
P	PM/Z	PM/PM	PB/PM	P	PM/Z	PM/PM	PB/PB

(a) Les paramètres k_1, k_2 (b) les paramètres j_1, j_2

$\begin{matrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \end{matrix}$	N	Z	P
N	PM	PS	PS
Z	PM	Z	PM
P	Z	PM	PB

(c) Les paramètres b, d

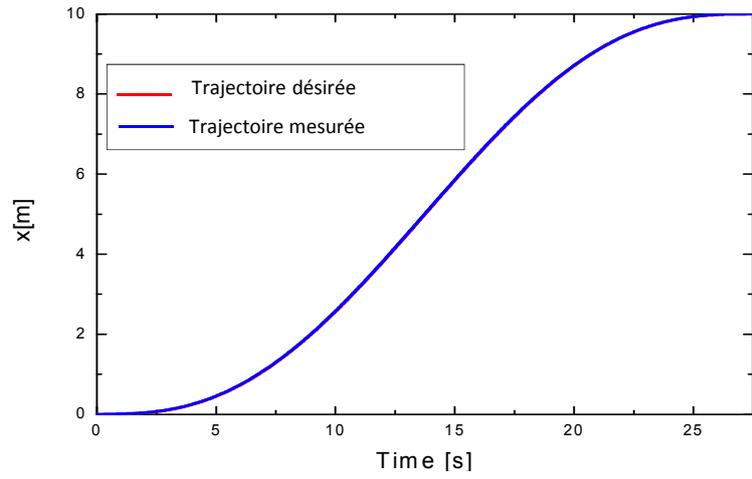
Tableau IV.3 Les règles d'inférence du contrôleur flou

IV.4.4. Résultats de simulation

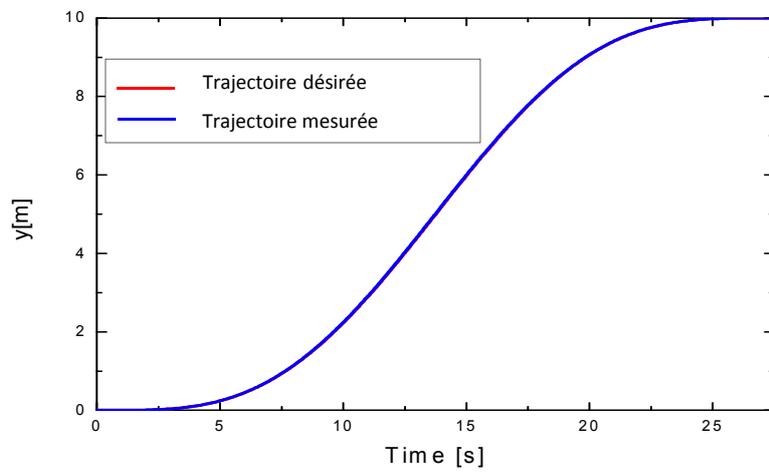
Pour évaluer l'efficacité du contrôleur proposé, des simulations numériques ont été réalisées à l'aide de l'environnement Matlab selon le schéma de principe présenté sur la figure IV.2.

Les trajectoires désirées ont été générées pour permettre au robot de passer de la configuration de départ: $x(0) = 0, y(0) = 0, \theta(0) = 0, \theta_1(0) = 0, \theta_2(0) = 0$ à la configuration finale souhaitée: $x(t_f) = 10, y(t_f) = 10, \theta(t_f) = 0, \theta_1(t_f) = 45^\circ, \theta_2(t_f) = 90^\circ$

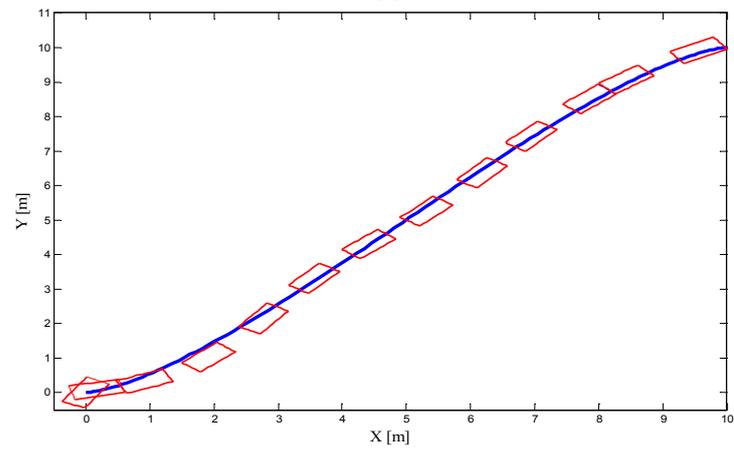
Comme mentionné précédemment, pour déterminer la durée minimale d'exécution, nous sélectionnons la vitesse linéaire maximale comme : $v_{\max} = 1 \text{ m/s}$ avec un temps d'échantillonnage de : $T = 0,05 \text{ s}$.



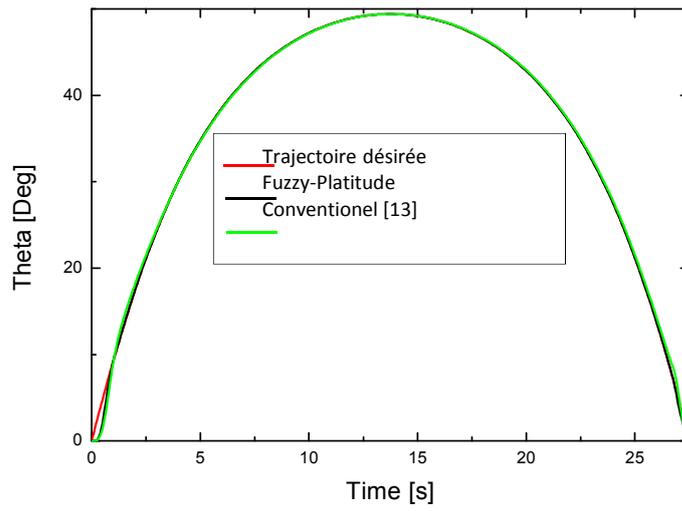
(a)



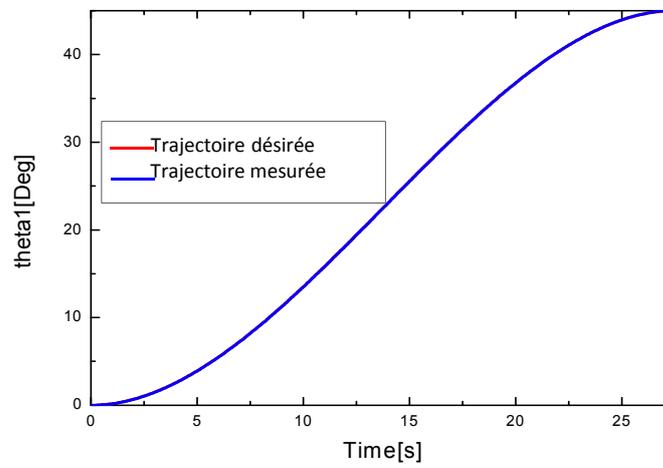
(b)



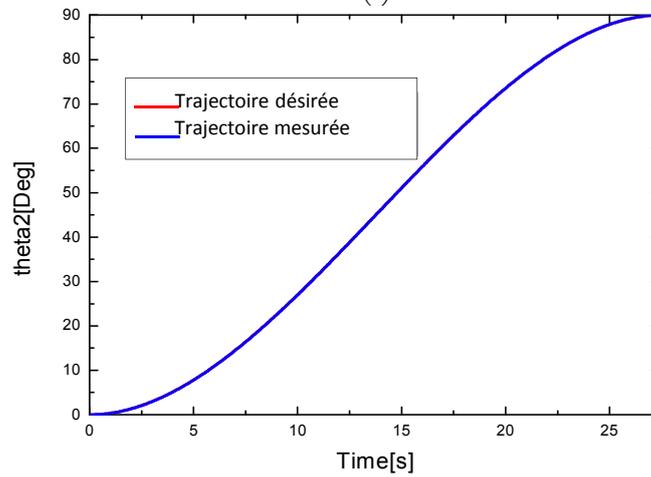
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure IV.4 Les résultats de simulation des trajectoires d'états (a) $x(t)$ (b) $y(t)$ (c) trajectoire de la plateforme mobile sur le simulateur MobileSim (d) $\theta(t)$ (e) $\theta_1(t)$ and (f) $\theta_2(t)$

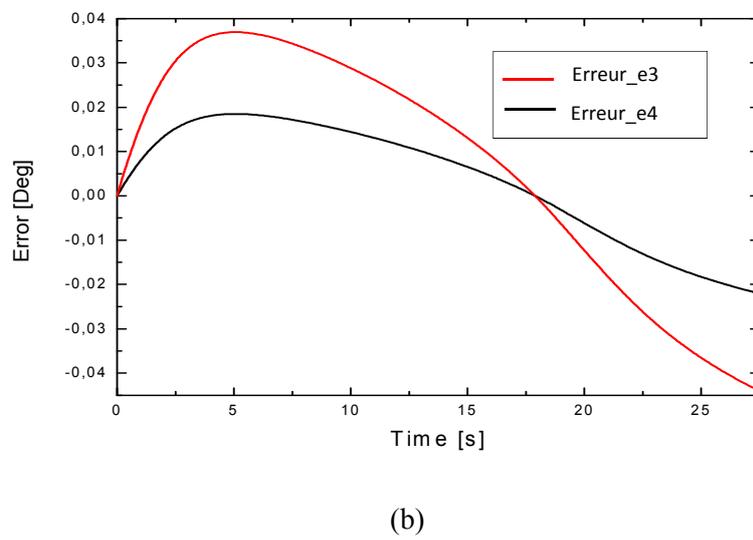
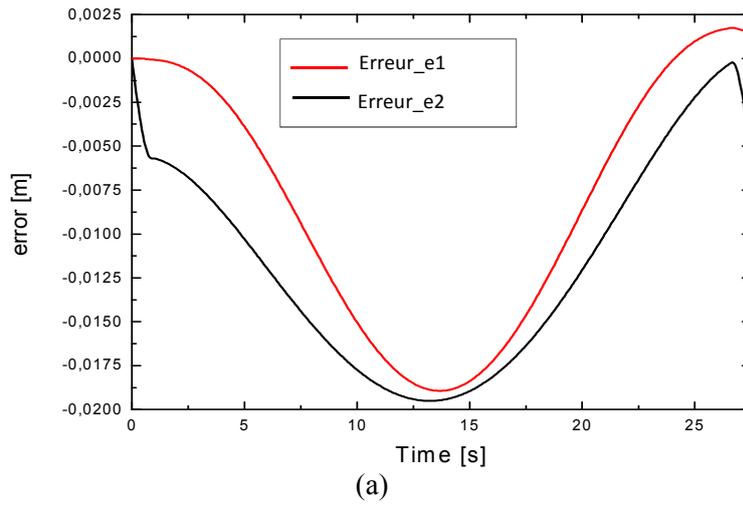
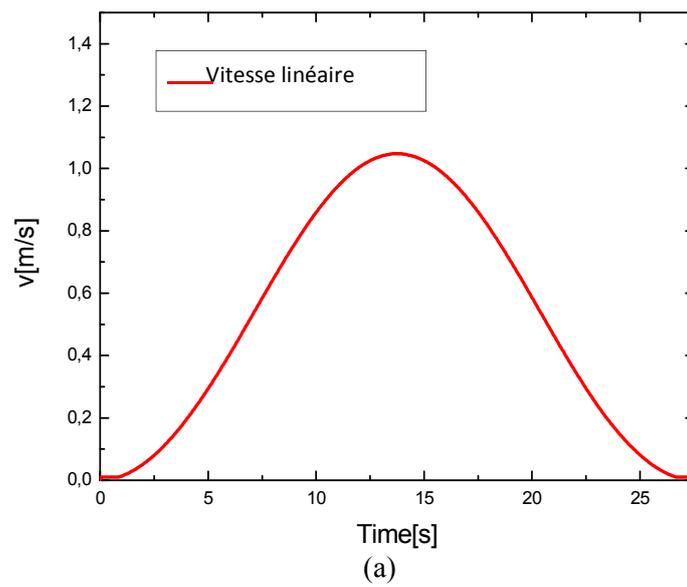


Figure IV.5 Les résultats de simulation de l'erreur (a) e_1 et e_2 (b) e_3 et e_4



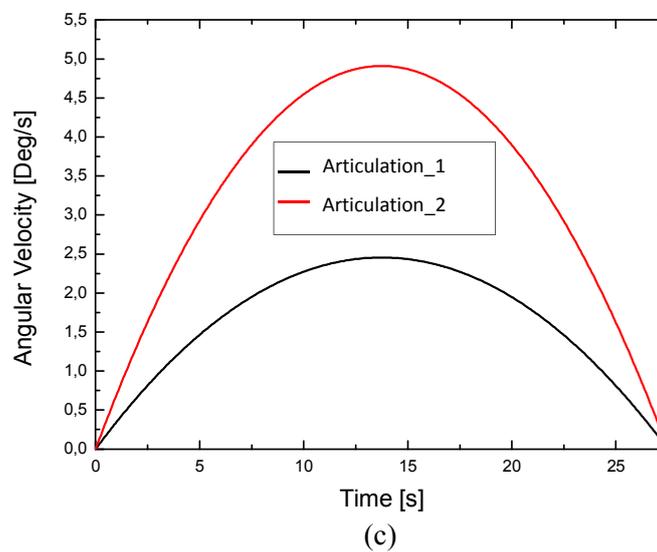
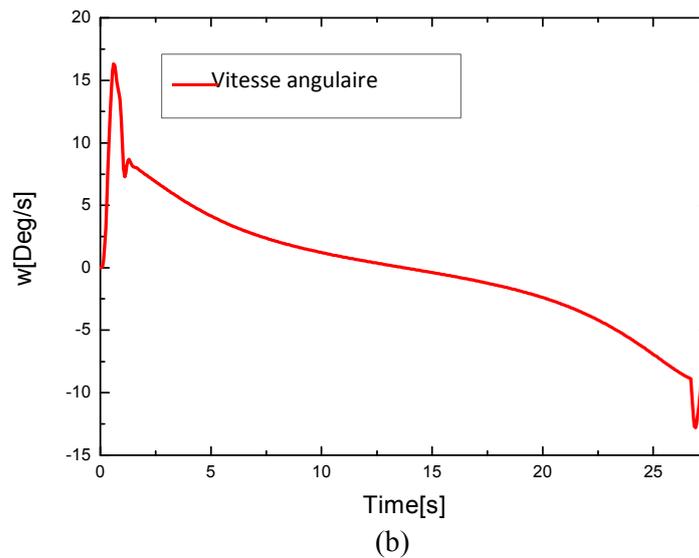


Figure IV.6 Les résultats de simulation des entrées de commande (a) $v(t)$ (b) $w(t)$ (c) $u_1(t)$ $u_2(t)$.

Il est clairement montré sur la figure IV.4.a.b.e.f, que les trajectoires mesurées, des variables d'état, suivent celles désirées avec une erreur admissible, comme indiqué sur la figure IV.5. Les valeurs d'erreur sont très faibles dans la phase de transition, ce qui permet de suivre les trajectoires désirées avec un temps de réponse minimal, montrant de meilleures performances du système.

La figure IV.4.c montre la trajectoire de la plate-forme mobile à l'aide du simulateur MobileSim du robot mobile Pioneer 3DX. Ces résultats montrent que le Pioneer 3DX répond aux signaux de contrôle avec une très grande précision en réalité virtuelle.

Pour évaluer l'efficacité du contrôleur proposé, il a été comparé à un contrôleur conventionnel [100] tel qu'il est présenté sur la figure IV.4.d, il est clairement montré que les résultats obtenus présentent une haute performance en termes de temps de réponse et d'erreur de suivi dans l'ensemble des trajectoires d'états. De plus, les entrées de commande sont montées sur la figure

IV.6. Dans ce cas, le signal de commande respecte les contraintes imposées par le système à contrôler.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons un suivi de trajectoire polynomiale d'un manipulateur mobile à roues planaires à l'aide d'un contrôleur couplé basé sur la platitude floue. Le contrôleur flou est conçu pour ajuster les paramètres du contrôleur de platitude en temps réel et pour prendre en compte la limitation de la vitesse linéaire de la base mobile à roues. La stratégie proposée garantit que le MMR suit parfaitement la trajectoire de référence avec une erreur acceptable. De plus, le manipulateur mobile est simulé en réalité virtuelle à l'aide du logiciel MobileSim dans lequel un bon accord est trouvé entre les résultats de réalité numérique et virtuelle.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous a permis d'apporter un certain nombre de solutions aux problèmes de commande et de planification de mouvements des systèmes robotiques. Une approche globale de la manipulation des systèmes robotiques avec des contraintes non holonomes a été présentée dans le but d'amener ces systèmes à suivre les trajectoires désirées.

Nous avons commencé par la modélisation des systèmes robotisés envisagés, notamment, la modélisation du robot mobile à roues et du manipulateur mobile à roues.

Parmi les techniques de commande existantes, nous avons introduit l'approche de la platitude qui demeure une technique très répandue combinant la planification du mouvement et la conception de contrôle. La platitude peut être exploitée aussi comme moyen de planification de mouvement ainsi que comme méthode de linéarisation par rétroaction exacte d'un point de vue de contrôle de suivi de trajectoire. La technique de contrôle flou reste aussi un outil puissant pour résoudre des problèmes de robustesse pratique et apporte son efficacité dans de nombreux domaines de la robotique.

La commande des robots étudiés a été abordée en tentant d'apporter des solutions à des problèmes liés à la synthèse d'un contrôleur et à la poursuite de trajectoire de référence et le rejet de perturbations.

En ce qui concerne le robot mobile à roues, la technique de platitude a été réalisée en exploitant une méthode de planification découplée chemin-trajectoire pour la planification de mouvement sûre et adaptative des tâches du robot. Cette approche est une révision des avancements dans le domaine de planification sous la considération des contraintes cinématiques. Par contre, une trajectoire polynomiale a été proposée pour la planification de trajectoire du manipulateur mobile à roues.

Une approche combinée d'un concept de la platitude et de l'algorithme d'auto-ajusté du contrôleur flou a été ensuite introduite, pour les deux systèmes, pour garantir l'exécution précise des trajectoires planifiées sous différentes considérations d'incertitudes.

Durant la phase de simulation, nous avons utilisé le simulateur du robot mobile MobileSim et le modèle du bras sous Matlab pour le robot manipulateur. Le contrôleur proposé a été implémenté et testé. Sur la base de l'algorithme développé et du prototype de test Pioneer-3dx et du bras manipulateur ainsi que le manipulateur mobile, des tests numériques ont été effectuées

pour évaluer les performances de l'approche proposée.

Les résultats de simulation obtenus de la méthode de commande exposée dans cette thèse qui est l'approche de planification découplée ont donné des performances acceptables en termes de suivi de trajectoire du mouvement des robots et demeurent valables et montrent bien l'efficacité et la robustesse de ce type de contrôleurs.

Comme perspectives :

- On envisage l'extension de l'algorithme d'autoréglage proposé à des systèmes plats linéarisés avec une rétroaction endogène de haut degré (par exemple ponts roulants).
- Planification et commande de mouvement sur les multi robots.
- Orientation de la commande pour des applications biomédicales.

Bibliographies

- [1] W. Khalil et E. Dombre, *Modeling, identification & control of robots*. London ; Sterling, VA: Kogan Page Science, 2004.
- [2] H. Delingette, M. Hebert, et K. Ikeuchi, « Trajectory generation with curvature constraint based on energy minimization », in *Proceedings IROS '91:IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, Osaka, Japan, 1991, p. 206-211. doi: 10.1109/IROS.1991.174451.
- [3] « Moving Along a Curve with Specified Speed ». David Eberly, 2 avril 2019.
- [4] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, et P. Rouchon, « On Differentially Flat Nonlinear Systems », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 25, n° 13, p. 159-163, juin 1992, doi: 10.1016/S1474-6670(17)52275-2.
- [5] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, et P. Rouchon, « Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples », *Int. J. Control*, vol. 61, n° 6, p. 1327-1361, juin 1995, doi: 10.1080/00207179508921959.
- [6] M. Boubezoula, A. Hassam, S. Khesrani, F. Srairi, et O. Boutalbi, « A New High Performance Control Strategy of Mobile Manipulator using Fuzzy-Flatness Approach with Gains Adjustment in Real Time », in *2019 8th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Marrakesh, Morocco, oct. 2019, p. 258-264. doi: 10.1109/ICSC47195.2019.8950641.
- [7] O. Boutalbi, K. Benmahammed, K. Henni, et B. Boukezata, « A high-performance control algorithm based on a curvature-dependent decoupled planning approach and flatness concepts for non-holonomic mobile robots », *Intell. Serv. Robot.*, vol. 12, n° 2, p. 181-196, avr. 2019, doi: 10.1007/s11370-018-00270-7.
- [8] M. Boubezoula, A. Hassam, et O. Boutalbi, « Robust-flatness Controller Design for a Differentially Driven Wheeled Mobile Robot », *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 16, n° 4, p. 1895-1904, août 2018, doi: 10.1007/s12555-017-0408-4.
- [9] B. Siciliano et O. Khatib, Éd., *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, 2008.
- [10] L. E. Aguilar, T. Hamel, et P. Soueres, « Robust path following control for wheeled robots via sliding mode techniques », in *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World*

-
- Applications. IROS '97*, Grenoble, France, 1997, vol. 3, p. 1389-1395. doi: 10.1109/IROS.1997.656541.
- [11] Z. Wang, S. Li, et S. Fei, « Finite-time tracking control of a nonholonomic mobile robot », *Asian J. Control*, vol. 11, n° 3, p. 344-357, mai 2009, doi: 10.1002/asjc.112.
- [12] Jong-Min Yang et Jong-Hwan Kim, « Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots », *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, n° 3, p. 578-587, juin 1999, doi: 10.1109/70.768190.
- [13] Zeng-Guang Hou, An-Min Zou, Long Cheng, et Min Tan, « Adaptive Control of an Electrically Driven Nonholonomic Mobile Robot via Backstepping and Fuzzy Approach », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, n° 4, p. 803-815, juill. 2009, doi: 10.1109/TCST.2009.2012516.
- [14] J. Peng, Y. Wang, et H. Yu, « Neural Network-Based Robust Tracking Control for Nonholonomic Mobile Robot », in *Advances in Neural Networks – ISNN 2007*, vol. 4491, D. Liu, S. Fei, Z.-G. Hou, H. Zhang, et C. Sun, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, p. 804-812. doi: 10.1007/978-3-540-72383-7_94.
- [15] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, et T. Noguchi, « A stable tracking control method for an autonomous mobile robot », in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, p. 384-389. doi: 10.1109/ROBOT.1990.126006.
- [16] A. De Luca, G. Oriolo, et M. Vendittelli, « Control of Wheeled Mobile Robots: An Experimental Overview », in *Ramsete*, vol. 270, S. Nicosia, B. Siciliano, A. Bicchi, et P. Valigi, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, p. 181-226. doi: 10.1007/3-540-45000-9_8.
- [17] G. Oriolo, A. De Luca, et M. Vendittelli, « WMR control via dynamic feedback linearization: design, implementation, and experimental validation », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 10, n° 6, p. 835-852, nov. 2002, doi: 10.1109/TCST.2002.804116.
- [18] P. Morin et C. Samson, « Motion Control of Wheeled Mobile Robots », in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano et O. Khatib, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 799-826. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_35.
- [19] G. Oriolo, « Wheeled Robots », in *Encyclopedia of Systems and Control*, J. Baillieul et T. Samad, Éd. London: Springer London, 2014, p. 1-9. doi: 10.1007/978-1-4471-5102-9_178-
-

- 1.
- [20] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, et P. Rouchon, « Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples », *Int. J. Control*, vol. 61, n° 6, p. 1327-1361, juin 1995, doi: 10.1080/00207179508921959.
- [21] A. Luviano-Juárez, J. Cortés-Romero, et H. Sira-Ramírez, « Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Through a Flatness-Based Exact Feedforward Linearization Scheme », *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 137, n° 5, p. 051001, mai 2015, doi: 10.1115/1.4028872.
- [22] H. Gharsallaoui, M. Ayadi, M. Benrejeb, et P. Borne, « Flatness-based Control and Conventional RST Polynomial Control of a Thermal Process », *Int. J. Comput. Commun. Control*, vol. 4, n° 1, p. 41, mars 2009, doi: 10.15837/ijccc.2009.1.2412.
- [23] E. Delaleau et A. M. Stankovic, « Flatness-based hierarchical control of the PM synchronous motor », in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, MA, USA, 2004, p. 65-70 vol.1. doi: 10.23919/ACC.2004.1383580.
- [24] J.-F. Stumper, F. Svaricek, et R. Kennel, « Trajectory tracking control with flat inputs and a dynamic compensator », in *2009 European Control Conference (ECC)*, Budapest, août 2009, p. 248-253. doi: 10.23919/ECC.2009.7074412.
- [25] L. Fan et L. Zhang, « Fuzzy Based Flatness Control of an Induction Motor », *Procedia Eng.*, vol. 23, p. 72-76, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2467.
- [26] J. Lévine, *Analysis and control of nonlinear systems: a flatness-based approach*. Berlin ; New York: Springer, 2009.
- [27] A. Dobra, « General classification of robots. Size criteria », in *2014 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, Smolenice, Slovakia, sept. 2014, p. 1-6. doi: 10.1109/RAAD.2014.7002249.
- [28] R. D. Ahmad Abu Hatab, « Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework », *Adv. Robot. Autom.*, vol. 02, n° 02, 2013, doi: 10.4172/2168-9695.1000107.
- [29] F. Thierry, « Contributions à la planification de mouvement », 2006. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00101623>
- [30] Lozano-Perez, « Spatial Planning: A Configuration Space Approach », *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-32, n° 2, p. 108-120, févr. 1983, doi: 10.1109/TC.1983.1676196.
- [31] « Contributions à la planification de mouvement ». Consulté le: 9 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00101623/document>

-
- [32] M. Matthieu, *conception d'un planificateur de trajectoires pour un robot mobile*. 2003.
- [33] Z. Li et J. F. Canny, Éd., *Nonholonomic Motion Planning*. Boston, MA: Springer US, 1993. doi: 10.1007/978-1-4615-3176-0.
- [34] J. -P. Laumond, *Robot Motion Planning and Control*, Lecture notes in control and information Science, springer., vol. 229. J. -P. Laumond, 1998.
- [35] M. Erdmann et T. Lozano-Perez, « On multiple moving objects », in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, 1986, vol. 3, p. 1419-1424. doi: 10.1109/ROBOT.1986.1087401.
- [36] J. Reif et M. Sharir, « Motion planning in the presence of moving obstacles », in *26th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1985)*, Portland, OR, USA, 1985, p. 144-154. doi: 10.1109/SFCS.1985.36.
- [37] K. Kant et S. W. Zucker, « Toward Efficient Trajectory Planning: The Path-Velocity Decomposition », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 5, n° 3, p. 72-89, sept. 1986, doi: 10.1177/027836498600500304.
- [38] K. Fujimura et H. Samet, « Motion planning in a dynamic domain », in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, p. 324-330. doi: 10.1109/ROBOT.1990.125996.
- [39] K. Fujimura et H. Samet, « A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles (mobile robot) », *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, n° 1, p. 61-69, févr. 1989, doi: 10.1109/70.88018.
- [40] C. L. Shih, T. T. Lee, et W. A. Gruver, « Motion planning with time-varying polyhedral obstacles based on graph search and mathematical programming », in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, p. 331-337. doi: 10.1109/ROBOT.1990.125997.
- [41] G. Sahar et J. H. Hollerbach, « planning of minimum-time trajectories for robot arms », *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, St Louis, MI (USA), p. 751-758, mars 1985.
- [42] Z. Shiller et S. Dubowsky, « Global time optimal motions of robotic manipulators in the presence of obstacles », in *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, p. 370-375. doi: 10.1109/ROBOT.1988.12076.
-

-
- [43] J. E. Bobrow, S. Dubowsky, et J. S. Gibson, « Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 4, n° 3, p. 3-17, sept. 1985, doi: 10.1177/027836498500400301.
- [44] Z. Shiller et S. Dubowsky, « On the optimal control of robotic manipulators with actuator and end-effector constraints », in *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 1985, vol. 2, p. 614-620. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087305.
- [45] J. Canny, B. Donald, J. Reif, et P. Xavier, « On the complexity of kinodynamic planning », in *[Proceedings 1988] 29th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, White Plains, NY, 1988, p. 306-316. doi: 10.1109/SFCS.1988.21947.
- [46] P. Jacobs, G. Heinzinger, J. Canny, et B. Paden, « Planning guaranteed near-time-optimal trajectories for a manipulator in a cluttered workspace. », *Research Report ESRC 89-20/RAMP 89-15, Engineering Systems Research Center*, Univ. of California., Berkeley, CA (USA), octobre 1989.
- [47] J. Canny, A. Rege, et J. Reif, « An exact algorithm for kinodynamic planning in the plane », *Discrete Comput. Geom.*, vol. 6, n° 3, p. 461-484, sept. 1991, doi: 10.1007/BF02574702.
- [48] B. R. Donald et P. G. Xavier, « Provably good approximation algorithms for optimal kinodynamic planning for Cartesian robots and open-chain manipulators », *Algorithmica*, vol. 14, n° 6, p. 480-530, déc. 1995, doi: 10.1007/BF01586637.
- [49] Z. Shiller et H.-H. Lu, « Robust computation of path constrained time optimal motions », in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, p. 144-149. doi: 10.1109/ROBOT.1990.125962.
- [50] T. Fraichard, « Dynamic trajectory planning with dynamic constraints: A “state-time space” approach », in *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, Yokohama, Japan, 1993, vol. 2, p. 1393-1400. doi: 10.1109/IROS.1993.583794.
- [51] J. T. Schwartz et M. Sharir, « On the “piano movers”” problem I. The case of a two-dimensional rigid polygonal body moving amidst polygonal barriers: ON THE « PIANO MOVERS » PROBLEM” », *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. 36, n° 3, p. 345-398, mai 1983, doi: 10.1002/cpa.3160360305.
-

-
- [52] J. T. Schwartz et M. Sharir, « On the Piano Movers' Problem: III. Coordinating the Motion of Several Independent Bodies: The Special Case of Circular Bodies Moving Amidst Polygonal Barriers », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 2, n° 3, p. 46-75, sept. 1983, doi: 10.1177/027836498300200304.
- [53] J. T. Schwartz et M. Sharir, « On the piano movers' problem: V. The case of a rod moving in three-dimensional space amidst polyhedral obstacles », *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. 37, n° 6, p. 815-848, nov. 1984, doi: 10.1002/cpa.3160370605.
- [54] « Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots », in *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 1985, vol. 2, p. 500-505. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087247.
- [55] Nilsson, Nils J., « A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques », 1969.
- [56] C. Guarino Lo Bianco et O. Gerelli, « Generation of Paths With Minimum Curvature Derivative With $\{\eta\}^3$ -Splines », *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 7, n° 2, p. 249-256, avr. 2010, doi: 10.1109/TASE.2009.2023206.
- [57] C. Guarino Lo Bianco et O. Gerelli, « Generation of Paths With Minimum Curvature Derivative With $\{\eta\}^3$ -Splines », *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 7, n° 2, p. 249-256, avr. 2010, doi: 10.1109/TASE.2009.2023206.
- [58] D. J. Walton et D. S. Meek, « A Note on Finding Clothoids », in *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 170, 2-2 vol., 2004, p. 433-453.
- [59] BOUTALBI Oussama, « Commande et Planification du Mouvement des Systèmes Non-linéaires Robotisés », UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1, Setif- Algeria, 2020.
- [60] R. J. Sharpe et R. W. Thorne, « Numerical method for extracting an arc length parameterization from parametric curves », *Comput.-Aided Des.*, vol. 14, n° 2, p. 79-81, mars 1982, doi: 10.1016/0010-4485(82)90171-3.
- [61] B. Guenter et R. Parent, « Computing the arc length of parametric curves », *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 10, n° 3, p. 72-78, mai 1990, doi: 10.1109/38.55155.
- [62] *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-85629-0.
- [63] A. Gasparetto, P. Boscariol, A. Lanzutti, et R. Vidoni, « Trajectory Planning in Robotics », *Math. Comput. Sci.*, vol. 6, n° 3, p. 269-279, sept. 2012, doi: 10.1007/s11786-
-

- 012-0123-8.
- [64] L. Bittner, « L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, E. F. Mishechenko, The Mathematical Theory of Optimal Processes. VIII + 360 S. New York/London 1962. John Wiley & Sons. Preis 90/- », *ZAMM - Z. Für Angew. Math. Mech.*, vol. 43, n° 10-11, p. 514-515, 1963, doi: 10.1002/zamm.19630431023.
- [65] D. Bushaw, « Functional analysis and time optimal control », *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 17, n° 1, p. 189-190, févr. 1972, doi: 10.1109/TAC.1972.1099914.
- [66] M. E. Kahn et B. Roth, « The Near-Minimum-Time Control Of Open-Loop Articulated Kinematic Chains », *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 93, n° 3, p. 164-172, sept. 1971, doi: 10.1115/1.3426492.
- [67] Tuttle, Timothy Douglas, « Creating time-optimal commands for linear systems », 1997. [En ligne]. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/1721.1/10098>
- [68] A. Vergnano *et al.*, « Modeling and Optimization of Energy Consumption in Cooperative Multi-Robot Systems », *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 9, n° 2, p. 423-428, avr. 2012, doi: 10.1109/TASE.2011.2182509.
- [69] O. Wigstrom, B. Lennartson, A. Vergnano, et C. Breitholtz, « High-Level Scheduling of Energy Optimal Trajectories », *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 10, n° 1, p. 57-64, janv. 2013, doi: 10.1109/TASE.2012.2198816.
- [70] « Minimum-Energy Robotic Exploration: A Formulation and an Approach », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 45, n° 1, p. 175-182, janv. 2015, doi: 10.1109/TSMC.2014.2332297.
- [71] A. J. Hausler, A. Saccon, A. P. Aguiar, J. Hauser, et A. M. Pascoal, « Energy-Optimal Motion Planning for Multiple Robotic Vehicles With Collision Avoidance », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, n° 3, p. 867-883, mai 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2475399.
- [72] W. Khalil, E. Dombre, et M. Nagurka, « Modeling, Identification and Control of Robots », *Appl. Mech. Rev.*, vol. 56, n° 3, p. B37-B38, mai 2003, doi: 10.1115/1.1566397.
- [73] O. Boutalbi, K. Benmahammed, et M. Boubezoula, « Robust feedback linearizing controller design for an overhead crane system », in *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Batna, Algeria, mai 2017, p. 640-645. doi: 10.1109/ICoSC.2017.7958723.

-
- [74] Jano Yazbeck, thèse « Accrochage immatériel sûr et précis de véhicules automatiques », Université de Lorraine, 2014.
- [75] P. Daviet et M. Parent, « Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon », in *Proceedings of Conference on Intelligent Vehicles*, Tokyo, Japan, 1996, p. 41-46. doi: 10.1109/IVS.1996.566349.
- [76] « Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, n° 4, p. 546-554, nov. 1993, doi: 10.1109/25.260756.
- [77] R. Fierro et F. L. Lewis, « Control of a nonholomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics », *J. Robot. Syst.*, vol. 14, n° 3, p. 149-163, mars 1997, doi: 10.1002/(SICI)1097-4563(199703)14:3<149::AID-ROB1>3.0.CO;2-R.
- [78] B. Dumitrascu, A. Filipescu, and V. Minzu, « Backstepping control of wheeled mobile robots », *Syst. Theory Control Comput. CSTCC 2011 15th Int. Conf.*, p. 1-6, 2011.
- [79] S. Arslan and H. Temeltaş, « Robust Motion Control of a Four Wheel Drive Skid-Steered Mobile Robot », *Skid- Electr. Electron. Eng. ELECO 2011 7th Int. Conf.*, p. II-415-II-419, 2011.
- [80] DongKyoung Chwa, J. H. Seo, Pyojae Kim, et Jin Young Choi, « Sliding mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots », in *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, Anchorage, AK, USA, 2002, p. 3991-3996 vol.5. doi: 10.1109/ACC.2002.1024553.
- [81] R. Solea, A. Filipescu, and U. Nunes, « Sliding-mode control for trajectory-tracking of a Wheeled Mobile Robot in presence of uncertainties », *Asian Control Conf. 2009 7th*, p. 1701-1706., 2009.
- [82] Y. Koubaa, M. Boukattaya, et T. Damak, « Adaptive sliding-mode control of nonholonomic wheeled mobile robot », in *2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Hammamet, Tunisia, déc. 2014, p. 336-342. doi: 10.1109/STA.2014.7086759.
- [83] F. N. Martins, W. C. Celeste, R. Carelli, M. Sarcinelli-Filho, et T. F. Bastos-Filho, « An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking », *Control Eng. Pract.*, vol. 16, n° 11, p. 1354-1363, nov. 2008, doi: 10.1016/j.conengprac.2008.03.004.
- [84] L. Xin, Q. Wang, J. She, et Y. Li, « Robust adaptive tracking control of wheeled mobile
-

- robot », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 78, p. 36-48, avr. 2016, doi: 10.1016/j.robot.2016.01.002.
- [85] A. R. Benaskeur, « Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires », 2002.
- [86] G. G. Rigatos, *Nonlinear Control and Filtering Using Differential Flatness Approaches: Applications to Electromechanical Systems*, 1st ed. 2015. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2015.
- [87] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, et P. Rouchon, « Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples », *Int. J. Control*, vol. 61, n° 6, p. 1327-1361, juin 1995, doi: 10.1080/00207179508921959.
- [88] M. Fliess, J. Levine, P. Martin, et P. Rouchon, « A Lie-Backlund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems », *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 44, n° 5, p. 922-937, mai 1999, doi: 10.1109/9.763209.
- [89] K. Al-Mutib *et al.*, « Mobile robot nonlinear feedback control based on Elman neural network observer », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, n° 12, p. 168781401562032, déc. 2015, doi: 10.1177/1687814015620328.
- [90] P. Martin et P. Rouchon, « Feedback linearization and driftless systems », *Math. Control Signals Syst.*, vol. 7, n° 3, p. 235-254, sept. 1994, doi: 10.1007/BF01212271.
- [91] T. Takagi et M. Sugeno, « Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-15, n° 1, p. 116-132, janv. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [92] N. Sato, D. Okabe, et Y. Morita, « Automatic trajectory tracking of a search camera on a redundant mobile manipulator considering obstacle avoidance », in *2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, Poznan, Poland, juill. 2015, p. 165-169. doi: 10.1109/RoMoCo.2015.7219730.
- [93] S. Khesrani, A. Hassam, M. Boubezoula, et F. Srairi, « Modeling and control of mobile platform using flatness-fuzzy based approach with gains adjustment », in *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Batna, Algeria, mai 2017, p. 173-177. doi: 10.1109/ICoSC.2017.7958662.
- [94] W. Sun et Jianwei Xia, « Adaptive control for mobile manipulators with affine constraints », in *2016 3rd International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS)*, Jinzhou, Liaoning, China, août 2016, p. 354-357.

doi: 10.1109/ICCSS.2016.7586480.

- [95] H. Chen, Y. Zhao, et J.-M. Lee, « LQR control for a Mobile Manipulator using COG feedback », in *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Busan, South Korea, juill. 2015, p. 921-924. doi: 10.1109/AIM.2015.7222656.
- [96] Y. Hargas, A. Mokrane, A. Hentout, O. Hachour, et B. Bouzouia, « Mobile manipulator path planning based on artificial potential field: Application on RobuTER/ULM », in *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Boumerdes, déc. 2015, p. 1-6. doi: 10.1109/INTEE.2015.7416774.
- [97] E. D. Markus, H. Yskander, J. T. Agee, et A. A. Jimoh, « Coordination control of robot manipulators using flat outputs », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 83, p. 169-176, sept. 2016, doi: 10.1016/j.robot.2016.05.006.
- [98] Jinwen Pan, Shimin Qi, et Yong Wang, « Flatness based active disturbance rejection control for cart inverted pendulum and experimental study », in *2015 American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, USA, juill. 2015, p. 4868-4873. doi: 10.1109/ACC.2015.7172096.
- [99] Y. Xia, F. Pu, S. Li, et Y. Gao, « Lateral Path Tracking Control of Autonomous Land Vehicle Based on ADRC and Differential Flatness », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n° 5, p. 3091-3099, mai 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2531021.
- [100] C. P. Tang, P. T. Miller, V. N. Krovi, J.-C. Ryu, et S. K. Agrawal, « Differential-Flatness-Based Planning and Control of a Wheeled Mobile Manipulator—Theory and Experiment », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 16, n° 4, p. 768-773, août 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2066282.

ملخص: تقدم هذه الأطروحة تقنية تحكم تعتمد على التسطیح والمنطق الضبابي للمعالجة الفعالة للأنظمة الروبوتية (ذراع روبوت متحرك + قاعدة ذات عجلات + ذراع روبوت متحركة فوق قاعدة ذات عجلات) في ظل قيود غير شاملة (nonholonomic constraints). يتم أولاً تحديد نهج تخطيط "طريق - مسار" منفصل لضمان إنشاء مسارات مرجعية تحترم القيود غير الشاملة ثم يتم تصميم قانون التحكم لضبط رد الفعل التلقائي لضمان التتبع الجيد للمهام المطلوبة على الرغم من عدم اليقين في خصائص النموذج وكذا الاضطرابات الخارجية. يتم ضبط مكاسب وحدة التحكم باستخدام وحدة تحكم ضبابية مناسبة. بناءً على الخوارزمية التي تم تطويرها على نموذج الاختبار Pioneer-3dx و ذراع الروبوت المتحرك بالإضافة إلى روبوت متحرك فوق قاعدة ذات عجلات ، تم تقديم محاكاة واختبارات عملية لتقييم أداء النهج المقترح.

كلمات مفتاحية: روبوت متحرك، مفهوم التسطح، المنطق الضبابي، تتبع المسار، تخطيط المسار.

Résumé : Cette thèse présente une technique de commande basée sur la platitude et la logique floue pour la manipulation efficace des systèmes robotisés (bras manipulateurs + plate forme mobile + manipulateurs mobiles) avec des contraintes non holonomes. Une approche de planification découplée «chemin-trajectoire» est d'abord définie pour assurer la génération de trajectoires de référence respectant les contraintes non holonomes. Une loi de commande de rétroaction endogène auto-ajustée est alors conçue pour assurer un bon suivi des trajectoires désirées malgré les incertitudes. Les gains du contrôleur sont ajustés en ligne à l'aide d'un contrôleur flou approprié. Sur la base de l'algorithme développé et du prototype Pioneer-3dx ainsi que le manipulateur mobile à roues, des tests ont été effectués pour évaluer les performances de l'approche proposée.

Mots Clés : Robot mobile, concept de la platitude, la logique floue, suivi de trajectoire, planification du chemin.

Abstract: This dissertation presents a fuzzy-flatness technique for the efficient manipulation of robotic systems (manipulator robot + wheeled mobile robot + mobile manipulators) with nonholonomic constraints. A decoupled "path-trajectory" planning approach is firstly defined to ensure the generation of reference trajectories that respect the nonholonomic constraints. An auto-tuned endogenous feedback control law is then designed to ensure good tracking of the desired tasks despite uncertainties. The controller gains are adjusted online by using a suitable fuzzy controller. Based on the developed algorithm and the laboratory test prototype Pioneer-3dx, including the wheeled mobile manipulator, numerical tests were carried out to evaluate the performances of the proposed approach.

Key Words : Mobile robot , Flatness , Fuzzy logic controller , Trajectory tracking , Path planning.