

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FCULTE DE TECHKNOLOGIE

DEPARTEMENT : Électronique

N° :



Filière: Automatique

Option: Robotique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Professionnel
Par: BENAISSA Amira, AIMEUR Houda

Intitulé

Gestion et contrôle d'un train de robots

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BOUKHALFA Abdelouahab

Université MSILA

Président

Dr. AIB Abdelghani

Université MSILA

Rapporteur

Dr. GHELLAB Mohamed Zinelaabidine

Université MSILA

Examineur

Année:2024/2025

الملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل نموذج التحكم في مجموعة من الروبوتات المتنقلة تتحرك ضمن تشكيل يشبه قطارًا، حيث يعتمد كل روبوت تابع على تتبع الروبوت الذي يسبقه وفقًا لمنهجية "القائد – التابع". تم في هذا العمل التركيز على تطوير دوال التحكم الخاصة بكل من الروبوت القائد والروبوتات التابعة، مع مراعاة الحفاظ على استقرار التشكيلة ودقة تتبع المسار. تم استخدام نماذج رياضية لوصف ديناميكيات الحركة، إضافة إلى تصميم خوارزميات تحكم مناسبة لضمان التنسيق بين الروبوتات. كما تم التطرق إلى عمليات إدارة التشكيلة، مثل إضافة أو إزالة روبوتات أثناء الحركة، وتحليل تأثيرها على الأداء العام للنظام. اعتمدنا على بيئة محاكاة لاختبار فعالية الإستراتيجية المقترحة، وقد أظهرت النتائج أن هذا النموذج يمكنه تحقيق تحكم جماعي منظم وفعال، مع الحفاظ على التناسق وسلامة التشكيل في مختلف السيناريوهات.

الكلمات المفتاحية: قطار الروبوتات، التحكم الغير خطي ، الروبوتات المستقلة.

Abstract

This work aims to study and analyze a control model for a group of mobile robots moving like a train, where each robot follows the one ahead based on a "leader–follower" approach. The focus is on designing control laws for both the leader robot and the follower robots, ensuring the stability of the group and accurate path tracking. Mathematical models were used to describe the motion dynamics, along with the development of appropriate control algorithms to ensure coordination among the robots. The work also addresses train management, such as adding or removing robots during operation. Simulations were conducted to evaluate the effectiveness of the proposed strategy, demonstrating that the system can achieve efficient collective control while maintaining train cohesion under various conditions.

Keywords: Train of robots, Nonlinear control, Autonomous robots.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif d'étudier et d'analyser un modèle de commande pour un groupe de robots mobiles évoluant comme un train, où chaque robot suit celui qui le précède selon une approche de type « leader – follower ». L'accent est mis sur le développement des lois de commande du robot leader ainsi que celles des robots suiveurs, tout en garantissant la stabilité du group et la précision du suivi de trajectoire. Des modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la dynamique du mouvement, accompagnés par la conception d'algorithmes de commande assurant la coordination entre les robots. La gestion du train, notamment l'ajout ou le retrait de robots en cours de mission, a également été abordée. Des simulations ont permis d'évaluer l'efficacité de la stratégie proposée, montrant que le système peut réaliser un contrôle collectif efficace tout en maintenant la cohésion de la formation dans divers scénarios.

Mots clés: Train de robots, Commande non linéaire, Robots autonomes.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre 1: Introduction aux robotiques mobiles

1.1. Introduction	03
1.2. Définitions	03
1.2.1. Etymologie.....	03
1.3. Historique	03
1.4. Types de robots	04
1.4.1 Les humanoïdes	04
1.4.2 Robots manipulateurs	05
1.4.3 Robots mobiles	05
1.5. Différences entre les robots mobiles et les robots fixes	06
1.5.1. Mobilité	06
1.5.2. Flexibilité.....	06
1.5.3. Applications	06
1.5.4. Infrastructure	06
1.6. Grande classes de la robotique mobile.....	06
1.6.1. Robot mobile à roues	06
1.6.2. Robot mobile à chenilles	07
1.6.3. Robot mobile à pattes	07
1.7. Architecture des robots mobiles.....	07
1.8. Mode de fonctionnement	07
1.9. Les applications des robots mobiles	08
1.10. Conclusion	09

Chapitre 2: Commande des Robots Mobiles

2.1 Introduction	10
2.2 Modélisation des robots mobiles	10
2.2.1 Types de robots mobiles	10
2.2.2 Les grandes classes de robots mobiles à roues et leurs modèles	11
2.2.2.1 Robots mobiles de type unicycle.....	11
2.2.2.2 Robots mobiles de type tricycle et de type voiture	12
2.2.2.3 Robots mobiles omnidirectionnels	13
2.3 Commande des Robots Mobiles	14
2.3.1 Modélisation Cinématique	14
2.3.2 Approches de Commande Classiques	14
2.3.2.1 Commande proportionnelle-dérivée (PD).....	14
2.3.2.2 Commande basée sur le modèle dynamique	14
2.3.3 Commande Linéarisante	15
2.3.3.1 Principe de Linéarisation par Bouclage	15
2.3.3.2 Linéarisation Entrée-Sortie	16
2.3.4 Commande par Mode Glissant	16
2.3.4.1 Définition	16
2.3.4.2 Objectif de la commande par mode glissant	16
2.3.4.3 Notion de base	17
2.3.4.4 Conception de la Surface de Glissement	18
2.3.4.5 Application aux Robots Mobiles	19
2.4 Commande d'un Train de Robots	19

2.4.1 Configuration et Modélisation	19
2.4.2 Modèle Leader-Follower	20
2.4.3 Stratégies de Commande pour train de robots	20
2.4.4 Stabilité de train de robots	20
2.4.5 Communication Inter-Robots	21
2.4.6 Gestion des Obstacles et Replanification	21
2.5 Conclusion	21

Chapitre 3: Contrôle d'un train de robots

3.1 Introduction	22
3.2 Problématique	22
3.3 Conception des commandes pour le contrôle et gestion du train de robot	23
3.3.1 Calcul de la fonction de commande pour le robot leader	23
3.3.2 Calcul de la fonction de commande pour les robots suiveurs	24
3.3.3 Gestion du train (ajout et retrait de robots à chaque station).....	25
3.4 Résultats et simulations	25
3.4.1 Simulation du train de robots proposé	25
3.4.2 Evolution de l'erreur de suivi pour le robot leader et les robots suiveurs	28
3.4.3. Évolution du signal de commande pour le robot leader et les robots suiveurs	29
3.5 Conclusion.....	31

Conclusion générale

Conclusion générale	32
---------------------------	----

Bibliographie

Bibliographie	33
---------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Canard mécanique vaucanson	04
Figure 1.2 Exemple d'un robot manipulateur	05
Figure 1.3 Modèle 3D du robot mobile (CARO).....	06
Figure 1.4 Architecture d'un robot mobile.....	07
Figure 2.1 Robot mobile de type unicycle	11
Figure 2.2 Robot mobile de type tricycle	12
Figure 2.3 robot mobile de type voiture et son CIR	13
Figure 2.4 Représentation d'un robot mobile omnidirectionnel.....	13
Figure 2.5 Glissement idéal	17
Figure 2.6 Glissement réel	17
Figure 3.1 Illustration du suivi de trajectoire par le robot leader avec gestion des robots.....	22
Figure 3.2 Position relative entre le robot leader et le robot suiveur.....	24
Figure 3.3 Simulation d'un robot suivant une trajectoire prédéfinie	26
Figure 3.4 Simulation d'un robot suiveur suivant un robot leader.....	26
Figure 3.5 Simulation d'un robot suivant un robot suiveur du robot leader.....	27
Figure 3.6. Simulation de la suppression d'un robot du train	27
Figure 3.7 Simulation de l'ajout d'un robot au train	28
Figure 3.8 Evolution de l'erreur de suivi d'une trajectoire par le robot leader	28
Figure 3.9 Evolution de l'erreur de suivi du robot leader par un robot suiveur	29
Figure 3.10 Evolution du signal de Commande pour le robot leader	30
Figure 3.11 Evolution du signal de commande de suivi pour le robot suiveur.....	30

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de robots mobiles sont devenus l'un des sujets de recherche les plus importants dans les domaines de l'intelligence artificielle, de l'automatisation et des systèmes embarqués, en raison de la diversité de leurs applications dans des secteurs tels que l'industrie, le transport, l'exploration et les missions militaires. [1].

Avec le développement de ces systèmes, le besoin de concevoir des modèles de commande efficaces s'est imposé afin de permettre la coordination entre plusieurs robots opérant collectivement et de manière organisée dans un même environnement [1].

Parmi les modèles proposés dans ce contexte, le concept de « train de robots » se distingue. Il s'agit d'un ensemble de robots se déplaçant de manière séquentielle et organisée, où chaque robot suit celui qui le précède, garantissant ainsi un mouvement coordonné tout au long de la trajectoire [2]. Ce groupe rappelle le comportement des wagons dans un train.

Ce type de système présente plusieurs avantages, notamment la réduction de la complexité du contrôle, l'amélioration de la navigation en groupe dans des environnements restreints, et la capacité à accomplir efficacement des tâches collectives [1][3]. Toutefois, le contrôle de tels systèmes soulève plusieurs défis techniques, tels que le maintien de la cohésion de la chaîne, le suivi précis de la trajectoire, et l'adaptation aux changements du nombre de robots pendant la mission [4].

Pour faire face à ces défis, des algorithmes de commande sont développés en s'appuyant sur des modèles mathématiques rigoureux, garantissant la stabilité et la synchronisation entre les robots dans le train. En outre, des techniques de simulation sont utilisées pour évaluer les performances et analyser le comportement du système dans diverses conditions avant sa mise en œuvre réelle [5].

Ce mémoire vise à étudier le modèle de contrôle d'un train de robots mobiles, en partant de la conception des lois de commande appropriées pour chaque robot dans le train, tout en mettant l'accent sur les aspects liés à la gestion de ce train (tels que l'ajout ou le retrait de robots) et l'analyse des résultats de simulation pour tester l'efficacité du modèle proposé.

❖ Problématique :

Dans un contexte où les systèmes robotiques deviennent de plus en plus autonomes et coopératifs, une question majeure se pose :

Comment concevoir une stratégie de contrôle efficace permettant à un groupe de robots mobiles autonomes de suivre de manière coordonnée le même trajet qu'un robot leader, tout en assurant la stabilité, la précision et la flexibilité du système, notamment lors de l'ajout ou du retrait d'un robot ?

❖ Objectif du travail :

L'objectif principal de ce travail est de :

Concevoir une architecture de contrôle pour un "train de robots" où un robot leader guide plusieurs robots suiveurs.

Développer et simuler des lois de commande permettant le suivi du leader avec une précision acceptable.

Gérer dynamiquement l'ajout et le retrait des robots tout en maintenant la cohésion et la performance du groupe.

❖ **Méthodologie adoptée :**

La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur les étapes suivantes :

Étude bibliographique : Analyse des travaux existants sur le contrôle multi-robots, les formations robotisées et les systèmes de suivi de leader.

Modélisation : Définition du modèle cinématique du robot leader et des suiveurs.

Conception des lois de commande : Élaboration de lois de commande adaptées pour le leader et pour les robots suiveurs.

Simulation : Mise en œuvre des algorithmes sous un environnement de simulation (comme MATLAB/Simulink) pour valider le comportement du système.

Analyse des résultats : Évaluation des performances du système en termes de stabilité, de précision de suivi, et de réactivité face aux changements de configuration.

Chapitre 1:

Introduction aux robotiques mobiles

I.1 Introduction :

Un robot est un dispositif électromécanique capable d'exécuter automatiquement des tâches spécifiques, souvent en réponse à des instructions programmées ou à l'aide de capteurs et d'intelligence artificielle. Les robots varient en forme et en fonction, et leurs applications couvrent plusieurs domaines comme l'industrie, la médecine, les services et l'exploration. Le développement des robots est l'un des grands accomplissements de la technologie moderne, car ils permettent d'améliorer l'efficacité et de réduire les risques dans les tâches difficiles ou répétitives.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu sur la robotique de manière générale, Nous citons quelques points de son histoire d'évaluation, nous donnerons une définition du robot et ses différents types et sa composition et les Domaines d'utilisation.[6]

I.2 Définitions :

La robotique regroupe plusieurs disciplines telles que la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique. Elle se divise en deux grandes catégories : les robots industriels et les robots mobiles. Les robots industriels, généralement fixes, sont utilisés dans diverses applications industrielles telles que l'assemblage mécanique, le soudage, la peinture, etc.

Les robots mobiles, quant à eux, sont mobiles et peuvent être classés selon différents critères, tels que le type de locomotion (robots marcheurs, à roues, à chenilles), le domaine d'application (robots militaires, de laboratoire, industriels, de services), ainsi que leur niveau d'autonomie (Télécommander, semi-autonomes ou autonomes).[7]

I.2.1 Etymologie :

Le terme "robot" a été inventé par l'écrivain tchécoslovaque Karel Čapek en 1920 dans sa pièce de science-fiction *R.U.R.*. Il dérive du mot tchèque "robota", signifiant corvée, et du terme "rob", esclave en vieil esclavon. Proposé par son frère Josef, ce mot masculin symbolise un être animé conçu pour le travail forcé.[8]

I.3 Historique : [9]

L'apparition des robots remonte au début du XXe siècle, lorsqu'un certain nombre d'ingénieurs ont cherché à tester des théories formulées par des biologistes et des psychologues.

- **En 1738** : Jacques Vaucanson conçoit un canard mécanique en cuivre capable d'imiter des fonctions biologiques telles que boire, manger, cacarder et digérer, ce qui représentait une prouesse technique remarquable à l'époque.
- **En 1921** : l'écrivain tchèque Karel Čapek introduit le terme "robot" dans sa pièce *R.U.R.* (*Rossum's Universal Robots*). Le mot "robota", d'origine tchèque, signifie "travail forcé" et désigne un être artificiel destiné au travail.
- **En 1940** : Isaac Asimov publie plusieurs nouvelles sur les robots, dans lesquelles il énonce les célèbres trois lois de la robotique.
- **En 1948** : Grey Walter crée la première tortue robotique autonome, capable de se déplacer en direction de la lumière. Cependant, elle n'était pas programmable.
- **En 1961** : le tout premier robot industriel, nommé UNIMATE, est intégré dans une chaîne de production chez General Motors.

I. Introduction aux robotiques mobiles

- **En 1972** : Nissan inaugure la première ligne de fabrication entièrement automatisée grâce aux robots.
- **En 1978** : le robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) est développé par General Motors, et il reste utilisé dans certaines applications industrielles.
- **En 1997** : un robot mobile est envoyé pour la première fois sur la planète Mars.
- **En 1999** : le robot de compagnie Aibo est lancé, marquant un tournant dans la robotique domestique.
- **En 2000** : Honda présente son robot humanoïde avancé Asimo, capable de marcher, courir et interagir avec les humains.
- **En 2003** : le projet Mars Exploration Rover (avec Spirit et Opportunity) voit le jour. Cette période est aussi marquée par la diversification des compétitions robotiques et les premières utilisations concrètes de drones sur des théâtres d'opérations comme en Irak. Enfin, en 2006, Sony décide de mettre fin à la production d'Aibo, jugeant le projet non rentable.
- **En 2009** : Lancement du projet Mars Science Laboratory, successeur de la mission Rover, qui aboutit à l'envoi du robot Curiosity sur Mars à la fin de l'année 2011.
- **En 2011** : Robonaut (R2B) devient le premier robot humanoïde envoyé dans l'espace. Il a été conçu et fabriqué par la NASA au Johnson Space Center (Houston, Texas), en collaboration avec General Motors et Oceanering.

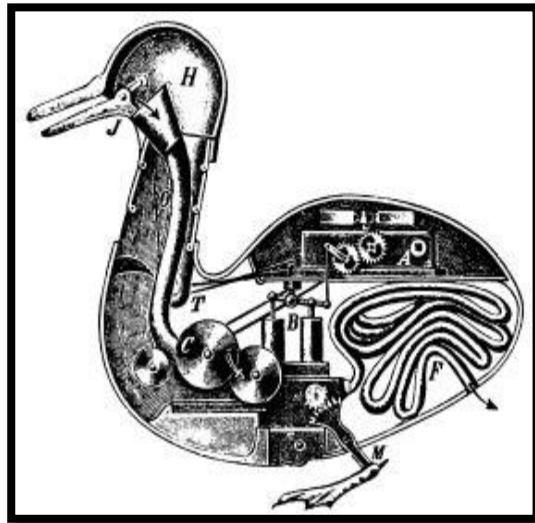


Figure 1.1: Canard mécanique vaucanson

I.4 Types de robots : [10]

Les robots se divisent en trois grandes catégories :

I.4.1 Les humanoïdes :

Cette catégorie est la plus célèbre, en grande partie grâce à la science-fiction. Elle englobe les robots anthropomorphes, c'est-à-dire ceux dont la forme évoque la morphologie humaine, ou qui imitent seulement certaines parties spécifiques du corps humain. Ces robots sont généralement composés d'une tête, d'un torse, de deux bras et de deux jambes.

Lorsqu'un robot reproduit non seulement l'apparence physique, mais aussi le comportement humain, on le désigne alors sous le terme d'androïde.

I.4.2 Robots manipulateurs :

Ces robots sont ancrés physiquement à leur poste de travail et sont souvent conçus pour accomplir des tâches spécifiques ou répétitives. La majorité de ces robots sont fixes, comme le montre la figure suivante



Figure 1.2: Exemple d'un robot manipulateur.

I.4.3 Robots mobiles :

Les robots mobiles sont capables de se déplacer dans divers environnements et peuvent être équipés ou non de manipulateurs en fonction de leur utilisation. Cette catégorie comprend notamment les robots explorateurs, conçus pour explorer des zones inaccessibles aux humains. Parmi ces robots, on retrouve les robots mobiles à roues ou à chenilles, appelés en anglais UGV (Unmanned Ground Vehicles), parfois désignés sous le terme de « rover » en raison de leur fonction principale : l'exploration.

Parmi les exemples notables, on trouve les missions d'exploration sur d'autres planètes, comme Mars, avec des robots tels que Sojourner, Spirit et Opportunity. Le plus célèbre d'entre eux est Curiosity, envoyé par la NASA pour explorer la surface martienne et analyser son terrain.

Les robots mobiles sont également utilisés dans des missions de recherche et de sauvetage, comme l'exploration d'épaves ou de décombres après des catastrophes (par exemple, la recherche de victimes lors des attentats du World Trade Center ou à la suite de tremblements de terre). En outre, certains sont dédiés au déminage de terrains, comme l'iRobot 510 utilisé par l'armée américaine.

Enfin, ces robots sont aussi employés pour l'exploration de zones radioactives, notamment pour l'entretien de réacteurs ou la gestion des piscines de stockage de déchets nucléaires.



Figure 1.3: Modèle 3D du robot mobile (CARO)

I.5 Différences entre les robots mobiles et les robots fixes : [11]

I.5.1 Mobilité :

Les robots mobiles peuvent se déplacer dans leur environnement, ce qui leur permet de changer de position et d'éviter les obstacles. À l'inverse, les robots fixes restent statiques, généralement installés sur des bases immobiles, ce qui limite leur action à une zone de travail restreinte.

I.5.2 Flexibilité :

Les robots mobiles offrent une grande flexibilité, car ils peuvent être reprogrammés pour exécuter différentes tâches et facilement déplacés dans divers environnements. En revanche, les robots fixes présentent une flexibilité moindre, étant souvent conçus pour des tâches spécifiques dans des conditions contrôlées, comme sur des chaînes de production industrielles.

I.5.3 Applications :

On retrouve les robots mobiles dans des domaines qui nécessitent un déplacement autonome, tels que la logistique, l'exploration ou encore le secteur de la santé. En comparaison, les robots fixes sont plus courants dans les environnements industriels pour réaliser des tâches répétitives comme l'assemblage, la soudure ou la peinture.

I.5.4 Infrastructure :

Les robots mobiles nécessitent peu d'infrastructures de soutien et peuvent fonctionner dans des environnements variables. À l'opposé, les robots fixes exigent des infrastructures plus complexes, comme des postes de travail, des convoyeurs ou encore des systèmes de sécurité spécifiques.

I.6 Grande classes de la robotique mobile : [12]

Les mécanismes de locomotion des robots mobiles se distinguent par leur capacité à se déplacer de différentes manières selon leurs applications spécifiques. Ces robots sont principalement classés en trois catégories : les robots à roues, les robots à pattes et les robots à chenilles.

I.6.1 Robot mobile à roues :

Les robots mobiles à roues sont actuellement les plus utilisés, en raison de la simplicité de conception de leur mécanisme de déplacement. À ce jour, la majorité des robots mobiles opèrent dans des environnements spécifiques, tels que des espaces intérieurs ou des sites industriels. En général, ils sont équipés de trois ou quatre roues, et dans certains cas rares, ils peuvent en posséder six ou davantage.

I.6.2 Robot mobile à chenilles :

Lorsque le terrain est irrégulier et difficile, les véhicules à roues rencontrent des difficultés à avancer. Les chenilles se révèlent alors plus efficaces, car elles offrent une meilleure adhérence au sol. La direction de déplacement est déterminée par la différence de vitesse entre les deux chenilles, comme le montre la figure 2 qui présente deux prototypes de robots mobiles à chenilles.

I.6.3 Robot mobile à pattes :

Lorsque le terrain devient très accidenté, présentant de fortes irrégularités, comme un sol couvert de rochers, les véhicules à roues ou à chenilles perdent en efficacité. Dans ce type de situation, les robots équipés de points d'appui discrets offrent une solution pertinente au problème de mobilité.

Cette approche est dite universelle, car la majorité des animaux terrestres se déplacent de cette façon. Toutefois, la conception et le contrôle de ce type de système restent complexes.

I.7 Architecture des robots mobiles : [13]

L'architecture d'un robot mobile, illustrée à la figure I.6, se compose de quatre éléments principaux :

- La structure mécanique accompagnée du système de déplacement (motricité).
- Les dispositifs de sécurité.
- Le système de traitement de l'information et de gestion des tâches.
- Le système de localisation.

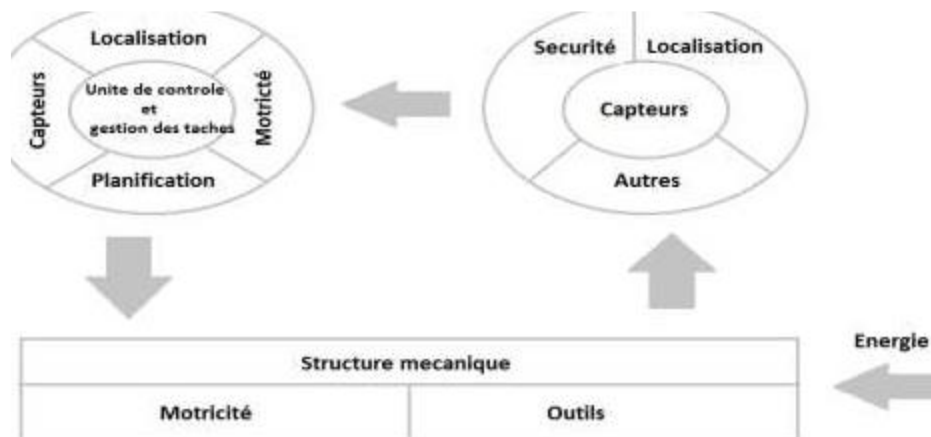


Figure I.4: Architecture d'un robot mobile.

I.8 Mode de fonctionnement :

On distingue deux principaux modes de fonctionnement pour un robot mobile : télé-opéré et autonome.

En mode télé-opéré, le terme robot (esclave) prend tout son sens, car une personne envoie les ordres et pilote le robot à distance à l'aide d'une interface de commande (comme un clavier ou une souris). Dans ce domaine, les recherches se concentrent principalement sur

l'amélioration de la perception de l'environnement par l'opérateur et sur la résolution des problèmes liés aux télécommunications.

En mode autonome, le robot doit prendre ses propres décisions. Pour cela, il doit être capable de percevoir correctement son environnement et d'agir en conséquence, selon son niveau d'autonomie. Il lui revient de planifier son trajet, d'éviter les obstacles et de choisir les mouvements nécessaires pour atteindre son objectif. Dans ce mode, les études portent essentiellement sur la structure de contrôle, les stratégies de commande, la planification et la notion d'autonomie décisionnelle.[14]

I.9 Les applications des robots mobiles :

Les applications des robots mobiles sont nombreuses et couvrent des domaines variés tels que la vie quotidienne, l'industrie, la sécurité, l'agriculture et le transport. À la maison, on utilise des aspirateurs robots qui se déplacent de manière autonome et gèrent intelligemment les obstacles pour nettoyer les sols sans intervention humaine.

Dans les usines, les robots mobiles contribuent au transport des matériaux et des pièces entre les étapes de production et les entrepôts, améliorant ainsi l'efficacité des opérations logistiques et renforçant le concept des « usines intelligentes ».

Ils jouent également un rôle important dans les domaines de la sécurité et de la défense, en désamorçant des explosifs, en opérant sous l'eau ou en utilisant des drones pour accomplir des tâches dangereuses pour l'homme.

Leurs applications ne s'arrêtent pas là : ils interviennent aussi dans l'agriculture pour améliorer la productivité et dans le transport routier à travers les véhicules autonomes, qui représentent l'avenir des moyens de transport modernes.[15]

I.10 Conclusion :

La robotique mobile ouvre de nouvelles perspectives passionnantes dans de nombreux domaines.

Les robots mobiles autonomes sont capables de se déplacer seuls dans des environnements variés, apportant des avantages tels qu'une meilleure efficacité, une sécurité renforcée et une productivité accrue.

Leur capacité à exécuter des tâches répétitives, dangereuses ou complexes permet aux humains de se consacrer à des missions à plus forte valeur ajoutée. Les avancées technologiques ne cessent d'améliorer la navigation, la perception et la communication de ces robots, les rendant toujours plus performants et polyvalents.

À mesure que la robotique mobile progresse, il devient essentiel de libérer tout son potentiel et de promouvoir la recherche et l'innovation pour relever les défis de demain.

Chapitre 2:

Commande des Robots Mobiles

II.1 Introduction

Les robots mobiles autonomes constituent un domaine central de la robotique contemporaine, en raison de leur rôle essentiel dans des applications variées telles que la logistique industrielle, la surveillance autonome, l'exploration, ainsi que les véhicules autonomes. La commande de ces systèmes représente un défi complexe, principalement à cause de leur dynamique non-linéaire, des contraintes non-holonomes propres à leur conception mécanique, et des perturbations extérieures provenant de l'environnement dans lequel ils évoluent [16].

Plus spécifiquement, les robots mobiles à roues sont soumis à des contraintes cinématiques qui limitent leurs mouvements instantanés. Par exemple, un robot différentiel à deux roues ne peut pas se déplacer latéralement sans effectuer une rotation préalable. Ces contraintes, dites non-holonomes, empêchent le robot de se déplacer librement dans toutes les directions à un instant donné, ce qui rend les stratégies de commande classiques inadéquates [17].

Pour surmonter ces limitations, les chercheurs ont développé plusieurs méthodes de contrôle avancées, parmi lesquelles :

- **La commande linéarisante par retour d'état** : cette approche consiste à transformer localement le système non-linéaire en un système linéaire afin d'appliquer des techniques de contrôle linéaire classiques. Elle permet d'assurer la **stabilité locale** et la **convergence des trajectoires** vers les positions et orientations désirées [18]
- **La commande par mode glissant (Sliding Mode Control)** : adaptée aux systèmes affectés par des perturbations ou des incertitudes, cette méthode offre une robustesse élevée et garantit que le robot suit une trajectoire prédéfinie malgré les perturbations externes [19].
- **Les techniques basées sur le suivi de trajectoire (Trajectory Tracking)** : elles permettent au robot de suivre précisément une trajectoire souhaitée tout en respectant les contraintes non-holonomes et les limites dynamiques du système [20].

Ainsi, le contrôle des robots mobiles autonomes nécessite non seulement une compréhension fine de leur dynamique et de leurs contraintes mécaniques, mais aussi l'application de méthodes avancées de commande afin d'assurer la précision, la stabilité et la robustesse des déplacements, surtout dans des environnements complexes et changeants.

II.2 Modélisation des robots mobiles

La modélisation d'un robot mobile vise à établir les relations mathématiques qui relient les vitesses des actionneurs (roues, moteurs) à la vitesse du robot dans le référentiel monde, en tenant compte des contraintes mécaniques et géométriques.

II.2. 1 Types de robots mobiles

On distingue principalement les catégories suivantes :

Commande des Robots Mobiles

- **Robots à roues (Wheeled Robots)** : Le modèle cinématique dépend du nombre de roues motrices, de leur disposition et de leur orientation (différentiel, tricycle, voiture, omnidirectionnel).
- **Robots à chenilles (Tracked Robots)** : Le déplacement est basé sur la vitesse relative des chaînes (gauche et droite), efficace sur terrain irrégulier.
- **Robots à pattes (Legged Robots)** : Le modèle combine la cinématique des articulations de chaque jambe ; il est plus compliqué mais adaptable à des terrains difficiles.

Chaque structure à un modèle cinématique (relation vitesse \rightarrow déplacement) et souvent un modèle dynamique (forces, inertie, frottement).

II.2.2 Les grandes classes de robots mobiles à roues et leurs modèles [29]

II.2.2.1 Robots mobiles de type unicycle

Description

On désigne par unicycle un robot actionné par deux roues indépendantes et possédant éventuellement un certain nombre de roues folles assurant sa stabilité. Le schéma des robots de type unicycle est donné à la figure suivante:

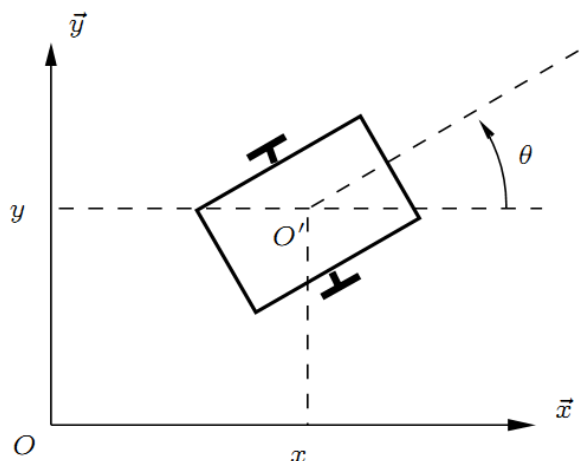


Figure 2.1 Robot mobile de type unicycle

Dans notre travail, nous considérons un robot mobile de type unicycle ou différentiel (deux roues motrices). Ce modèle est largement utilisé comme modèle de base pour les robots non holonomes, et de nombreux travaux le considèrent.

Modélisation

Modèle cinématique en posture relier la dérivée de la posture à la commande $u = (v \ w)^T$ par une simple considération géométrique donne :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.1)$$

II.2.2.2 Robots mobiles de type tricycle et de type voiture

Ces robots partagent des propriétés cinématiques proches, raison pour laquelle on les regroupe ici.

Description

Considérons tout d'abord le cas du tricycle, représenté à la figure 2.2. Ce robot est constitué de deux roues fixes de même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal du robot. Le mouvement est conféré au robot par deux actions : la vitesse longitudinale et l'orientation de la roue orientable. De ce point de vue, il est donc très proche d'une voiture.

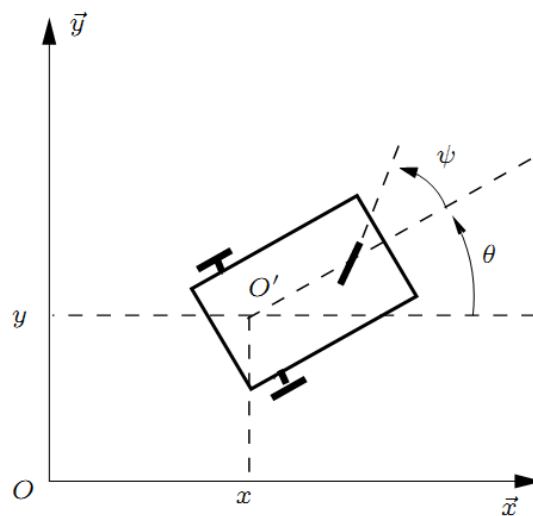


Figure 2.2 Robot mobile de type tricycle

Le cas du robot de type voiture est très similaire à celui du tricycle. La différence se situe au niveau du train avant, qui comporte deux roues au lieu d'une. Cela va de soit, on rencontre beaucoup plus souvent ce type de systèmes.

Modélisation

Considérons tout d'abord le tricycle. L'écriture des contraintes sur chacune des roues et un raisonnement similaire à celui suivi dans le cas de l'unicycle permettent de déterminer les modèles cinématiques des robots de type tricycle. Toutefois, par un simple raisonnement géométrique, on établit les équations :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{v}{D} \tan \varphi \\ \dot{\varphi} = \gamma \end{cases} \quad (2.2)$$

Où $u = (v \ \gamma)^T$ est le vecteur de commande cinématique, γ représentant la vitesse d'orientation imposée à la roue orientable. Ces équations sont celles du modèle cinématique en configuration simplifié.

L'équivalence entre tricycle et voiture est facile à montrer. Il suffit pour cela de figurer une roue virtuelle qui transformerait un robot de type voiture en tricycle en plaçant la roue orientable du tricycle au centre de l'axe des roues avant de la voiture, orientée de sorte que le CIR reste inchangé, conformément à la figure 2.3.

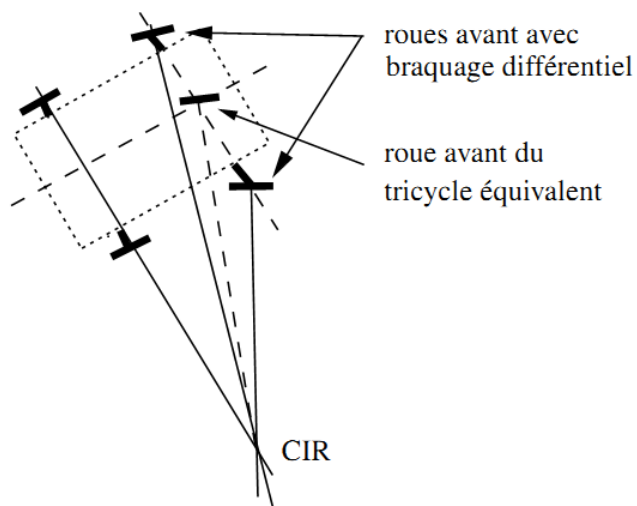


Figure 2.3 Un robot mobile de type voiture et son CIR

II.2.2.3 Robots mobiles omnidirectionnels

Description

Un robot mobile est dit omnidirectionnel si l'on peut agir indépendamment sur les vitesses : vitesse de translation selon les axes x et y et vitesse de rotation autour de z .

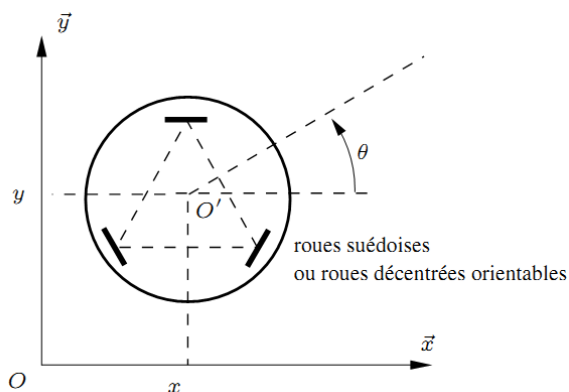


Figure 2.4 Représentation d'un robot mobile omnidirectionnel

Modélisation

Dans ce cas on peut considérer qu'il est possible de commander directement la posture et le modèle cinématique en posture est donc :

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 \\ \dot{y} = u_2 \\ \dot{\theta} = u_3 \end{cases} \quad (2.3)$$

II.3 Commande des Robots Mobiles

II.3.1 Modélisation Cinématique

Le modèle cinématique d'un robot mobile différentiel est généralement exprimé par le modèle décrit par l'équation (2.1) mais dans ce travail on a utilisé un modèle modifié du robot unicycle pour éviter la singularité de la commande linéarisante :

$$\begin{cases} \dot{x} = z \cos(\theta) \\ \dot{y} = z \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = u_1 \\ \dot{z} = u_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Où (x, y) représente la position dans le plan, θ l'orientation, u_2 l'accélération linéaire et u_1 la vitesse angulaire [21].

II.3.2 Approches de Commande Classiques

II.3.2.1 Commande proportionnelle-dérivée (PD) :

La commande PD est l'une des méthodes les plus simples et les plus utilisées pour le contrôle des robots mobiles. Elle repose sur l'évaluation de l'erreur de position entre la position actuelle du robot et la trajectoire désirée, ainsi que sur la dérivée de cette erreur, qui représente la vitesse d'écart. L'action proportionnelle permet de corriger rapidement les déviations, tandis que l'action dérivative contribue à amortir les oscillations et à stabiliser le mouvement. Cette approche est efficace pour des tâches simples ou des trajectoires peu complexes, offrant une réponse rapide et intuitive [22]. Cependant, elle montre ses limites dans les situations plus exigeantes : elle ne tient pas compte des contraintes dynamiques du robot et peut générer des erreurs accumulées ou des dépassements lorsque la trajectoire à suivre est complexe ou fortement non-linéaire.

II.3.2.2 Commande basée sur le modèle dynamique :

Contrairement à la commande PD, cette approche intègre directement le modèle dynamique complet du robot, en tenant compte des effets inertiels, des couples moteurs, des forces de friction et parfois des interactions avec l'environnement. En utilisant cette modélisation, il est possible de calculer les commandes de manière à compenser les effets dynamiques, ce qui améliore la précision du suivi de trajectoire et la stabilité du système, même à des vitesses élevées ou dans des trajectoires complexes [23]. Cette méthode, bien que plus complexe à mettre en œuvre, permet d'optimiser la performance globale du robot et d'assurer une meilleure robustesse face aux perturbations externes ou aux variations de charge.

II.3.3 Commande Linéarisante

II.3.3.1 Principe de Linéarisation par Bouclage

La linéarisation par retour d'état est une technique de contrôle avancée qui vise à simplifier la commande de systèmes non-linéaires complexes, comme les robots mobiles, en les transformant en un système linéaire équivalent. Cette transformation repose sur deux éléments fondamentaux :

1. **Changement de coordonnées :**

On introduit de nouvelles variables d'état, souvent appelées sorties différentiables ou variables de contrôle virtuelles, qui permettent de réécrire le système non-linéaire sous une forme linéaire partielle ou totale. Ce processus met en évidence les relations de dépendance entre les entrées et les sorties du système de manière plus directe.

2. **Loi de commande appropriée :**

Une loi de commande spécifique est conçue pour annuler les termes non-linéaires de la dynamique du système. En combinant cette loi avec le changement de coordonnées, le système résultant peut être traité comme un système linéaire classique, permettant l'application de méthodes de contrôle linéaire (par exemple PID, placement de pôles ou contrôle optimal).

Les avantages de cette approche incluent :

- **Suivi précis des trajectoires :** la méthode permet au robot de converger exactement vers la trajectoire souhaitée dans des conditions idéales.
- **Stabilité garantie :** si elle est correctement conçue, la linéarisation par retour d'état assure la stabilité asymptotique du système.
- **Possibilité d'utiliser des outils linéaires :** une fois linéarisé, le système peut être contrôlé avec des techniques linéaires bien maîtrisées, simplifiant la conception et l'analyse.

Cependant, cette méthode présente certaines limitations :

- **Dépendance au modèle exact :** la précision du modèle dynamique est cruciale. Toute incertitude ou perturbation non modélisée peut réduire l'efficacité du contrôle.
- **Complexité de mise en œuvre :** le calcul des transformations et de la loi de commande peut être complexe pour des systèmes très couplés ou à grande dimension.

Dans le contexte des robots mobiles autonomes, cette méthode est particulièrement utile pour les robots à roues soumis à des contraintes non-holonomes, car elle permet de concevoir des trajectoires de suivi précises malgré la nature non-linéaire de leurs équations de mouvement [24][25].

II.3.3.2 Linéarisation Entrée-Sortie

La linéarisation par retour d'état consiste à transformer la relation non-linéaire entre les entrées de commande et certaines sorties choisies en une relation linéaire, facilitant ainsi la conception des lois de commande. Plus précisément, on sélectionne des sorties différentiables et on construit une loi de contrôle qui annule les termes non-linéaires de la dynamique pour ces sorties. Le résultat est un système linéarisé sur lequel il est possible d'appliquer des techniques de contrôle linéaire classiques, telles que les contrôleurs PID ou le placement de pôles [27].

Avantages:

- Simplification du problème de commande
- Utilisation possible de techniques de commande linéaire
- Convergence asymptotique garantie sous certaines conditions

Limitations :

- Nécessite une connaissance précise du modèle
- Sensibilité aux incertitudes paramétriques
- Peut ne pas fonctionner globalement [26].

II.3.4 Commande par Mode Glissant

II.3.4.1 Définition

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commande non linéaire qui est caractérisée par sa robustesse et son efficacité. Elle consiste à commuter à l'aide des fonctions discontinues la structure du système dynamique de manière que le vecteur d'état suive une trajectoire $(x) = 0$ dans l'espace d'état.

II.3.4.2 Objectif de la commande par mode glissant

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

II.3.4.3 Notion de base

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

- **Régime glissant idéal :**

Le régime glissant idéal correspond à oscillation de fréquence infinie (∞) et d'amplitude nulle [28].

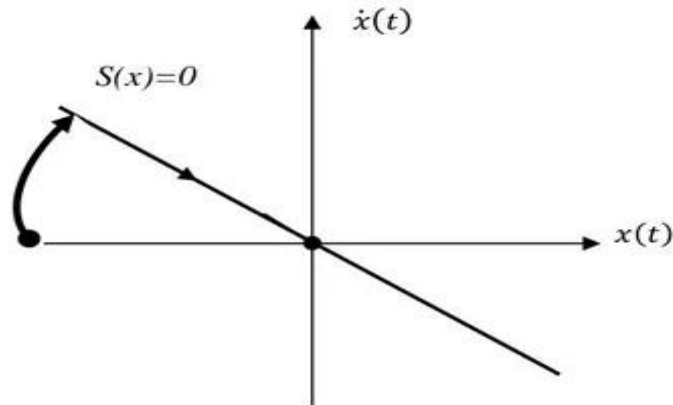


Figure 2.5: Glissement idéal [28].

- **Régime glissant réel:**

En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir des relais qui présente des imperfections comme le retard de commutation, alors la trajectoire de régime de glissant ne peut pas osciller idéalement à une fréquence infinie [28]. Glissement réel fréquence de commutation finie, amplitude oscillatoire.

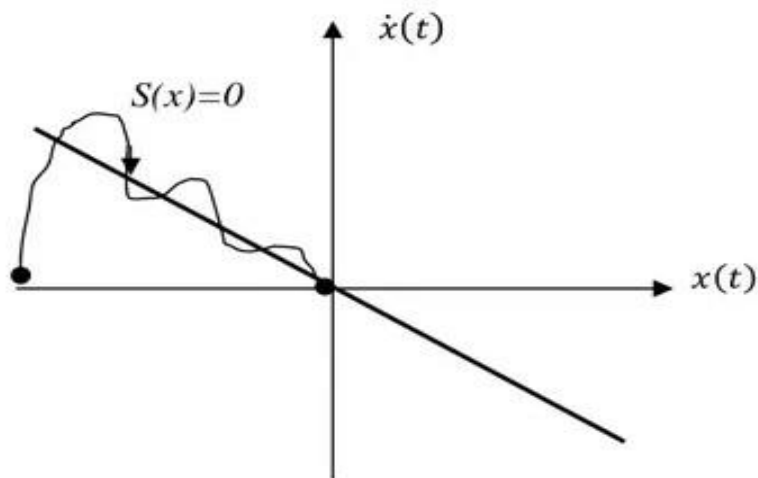


Figure 2.6 : Glissement réel [28].

II.3.4.4 Conception de la Surface de Glissement

II.3.4.4.1 Conception de la commande par mode de glissement

La conception des régulateurs par **modes glissants** permet de traiter les problèmes de stabilité ainsi que l'atteinte des performances désirées de manière systématique. La mise en œuvre de cette stratégie de commande repose principalement sur trois étapes essentielles :

- le choix de la surface de glissement ;
- l'établissement des conditions d'existence et de convergence ;
- la détermination de la loi de commande.

II.3.4.4.2 Choix de la surface de glissement

Elle est déterminée sur la base du système et des performances désirées. Dans un cas général, considérons le système décrit par la représentation d'état non linéaire suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \quad (2.5)$$

où, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ représente le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}$ est le vecteur de commande et $f(x) \in \mathbb{R}^n$ et $g(x) \in \mathbb{R}^n$ sont des fonctions non linéaires continues et connues.

La surface de glissement ou la fonction de commutation représente le comportement dynamique désiré du système en boucle fermée. Elle peut être choisie linéaire ou non linéaire.

L'une des formes que la surface peut prendre est donnée par [28] :

$$s(x) = \left[\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right]^{r-1} e(x) \quad (2.6)$$

Avec, $e(x) = x_{ref} - x$ est l'écart de la variable à régler, $\lambda > 0$ est une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré, et r est le degré relatif du système, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$ pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalente à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

Ainsi, on impose une dynamique désirée de l'erreur de la forme :

$$e^{(r)}(t) + \lambda^1 e^{(r-1)}(t) + \dots + \lambda^r e(t) = 0 \quad (2.7)$$

Où $e^{(r)}(t)$ représente la dérivée d'ordre r de l'erreur. Cette équation différentielle d'ordre r est asymptotiquement stable pour tout choix de $\lambda > 0$, ce qui assure la convergence de l'erreur vers zéro.

Pour obtenir cette dynamique, il est nécessaire de dériver la sortie du système jusqu'à faire apparaître explicitement l'entrée de commande $u(t)$. Cette étape correspond à la **linéarisation entrée-sortie**, qui transforme localement le système non linéaire en un système linéaire équivalent vis-à-vis de l'erreur.

La loi de commande peut alors s'écrire sous la forme :

$$u(t) = \alpha(x) + \beta(x)v(t) \quad (2.8)$$

Où $\alpha(x)$ et $\beta(x)$ sont des fonctions non linéaires dépendant de l'état, et $v(t)$ est une entrée auxiliaire choisie de manière à imposer la dynamique désirée de l'erreur, soit :

$$v(t) = x_{ref}^{(r)}(t) - \lambda^r e(t) \quad (2.9)$$

En substituant $v(t)$ dans la commande, on obtient une loi de commande non linéaire assurant la poursuite de trajectoire avec une convergence exponentielle de l'écart vers zéro.

Cette méthode permet ainsi d'obtenir une régulation robuste et performante, en garantissant une dynamique de suivi imposée par le choix du paramètre λ , tout en respectant la condition de stabilité et de convergence du système en boucle fermée[30].

II.3.4.5 Application aux Robots Mobiles

Yang et Kim (1999) [31] ont proposé une commande par mode glissant adaptative spécialement destinée au suivi de trajectoire des robots mobiles non holonomes. Cette approche combine les avantages classiques de la commande par mode glissant (SMC) — tels que la robustesse face aux perturbations et aux incertitudes — avec une adaptation en ligne des paramètres de contrôle. Ainsi, le système est capable de compenser automatiquement les incertitudes paramétriques liées au modèle dynamique du robot.

II.4 Commande d'un Train de Robots

II.4.1 Configuration et Modélisation

Un train de robots est un ensemble de robots autonomes composé d'un robot leader et d'un ou plusieurs robots suiveurs. L'objectif est de coordonner leurs mouvements pour suivre une trajectoire prédéfinie tout en maintenant une formation spécifique, ce qui est crucial dans des applications telles que la logistique automatisée, la surveillance ou les véhicules autonomes convoyés.

Plusieurs approches de formation ont été proposées dans la littérature :

1. Leader-Follower (Leader-Suiveur) :

Dans cette approche, le **robot leader** suit la trajectoire souhaitée, tandis que chaque robot suiveur maintient une **position relative fixe par rapport au leader**. Cette méthode est simple à implémenter et intuitive, mais elle peut présenter des limitations si le leader est confronté à des obstacles imprévus, car les followers dépendent directement de ses mouvements [32].

2. Formation virtuelle (Virtual Structure) :

Tous les robots considèrent un point ou une structure virtuelle se déplaçant le long de la trajectoire désirée. Chaque robot ajuste sa position pour rester à l'intérieur de cette structure, ce qui permet de maintenir une formation globale cohérente. Cette approche assure une coordination plus rigide de l'ensemble du groupe et une meilleure résistance aux perturbations [33].

3. Basée sur le comportement (Behavior-Based Formation) :

Cette méthode combine plusieurs comportements locaux, tels que l'évitement d'obstacles, le maintien de la formation et l'interaction avec les autres robots. Chaque robot prend ses décisions en fonction de règles simples, ce qui permet une grande flexibilité et adaptabilité aux environnements dynamiques, mais peut rendre la formation moins précise et moins stable qu'avec les approches centralisées [34].

Le choix de l'approche dépend de l'application et des contraintes : la Leader-Follower est adaptée aux formations simples, la Formation virtuelle convient aux trajets nécessitant une précision élevée, tandis que la méthode comportementale est efficace dans des environnements incertains ou dynamiques.

II.4.2 Modèle Leader-Follower

Pour un système leader-follower, les équations d'erreur peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \dot{e}_d = -v_f \cos(\theta_e) + v_l \\ \dot{e}_\alpha = v_f \sin(\theta_e) \\ \dot{\theta}_e = \omega_l - \omega_f \end{cases} \quad (2.10)$$

Où e_d est l'erreur de distance, e_α l'erreur latérale, et θ_e l'erreur d'orientation [35].

II.4.3 Stratégies de Commande pour train de robots

Commande décentralisée : Chaque robot calcule sa commande indépendamment basée sur l'information locale [36].

Commande distribuée : Les robots partagent l'information avec leurs voisins pour coordonner leurs actions [37].

Commande hiérarchique : Combinaison de niveaux de décision stratégique et tactique [23].

II.4.4 Stabilité de train de robots

La stabilité de la chaîne doit être garantie pour éviter la propagation d'erreurs (string stability). Les conditions de stabilité dépendent des gains de commande et de l'espacement entre véhicules [38].

II.4.5 Communication Inter-Robots

Les architectures de communication influencent grandement les performances :

Topologie en chaîne : Chaque robot communique uniquement avec son prédécesseur [40].

Topologie bidirectionnelle : Communication entre voisins directs dans les deux sens, améliorant la réactivité [41].

Topologie avec leader : Plusieurs robots reçoivent directement l'information du leader, réduisant les délais de propagation [42].

II.4.6 Gestion des Obstacles et Replanification

La formation doit pouvoir s'adapter dynamiquement aux obstacles :

- **Déformation élastique** : La formation se déforme temporairement puis reprend sa configuration [43].
- **Reconfiguration** : Changement de la structure de formation [44].
- **Division-fusion** : La formation se divise puis se reforme [45].

II.5 Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité de la commande des robots mobiles, principalement due à leur dynamique non linéaire et à leurs contraintes non-holonomes. Les méthodes classiques assurent un certain suivi de trajectoire, mais restent limitées face aux incertitudes et aux perturbations externes. À l'inverse, les approches avancées, telles que la linéarisation par retour d'état et la commande par mode glissant, offrent une meilleure robustesse et garantissent la stabilité du système. Par ailleurs, la commande de train de robots souligne l'importance de la coordination et de la coopération entre plusieurs agents. Ainsi, il apparaît que la conception de lois de commande efficaces pour les robots mobiles requiert une intégration de techniques robustes et adaptatives, capables d'assurer précision, stabilité et fiabilité dans des environnements réels complexes.

Chapitre 3:
Contrôle d'un train de robots

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions un système de contrôle pour un groupe de robots mobiles se déplaçant en group similaire à un train, où le premier robot (le leader) guide les autres robots (les suiveurs) sur la même trajectoire tout en maintenant des distances et des positions précises.

Nous présentons la problématique principale de ce type de systèmes, la conception des fonctions de commande pour le leader et les suiveurs, ainsi que la gestion du train lors de l'ajout ou du retrait de robots à certaines stations. Enfin, nous présentons les résultats de simulation qui confirment l'efficacité du système proposé.

III.2. Problématique

Comment permettre au robot leader de suivre un chemin précis ?

Comment assurer le suivi du robot leader par les autres robots ?

Comment gérer l'ajout et le retrait de robots dans le train ?

La figure suivante le principe de fonctionnement du système à commander (Le train de robots):

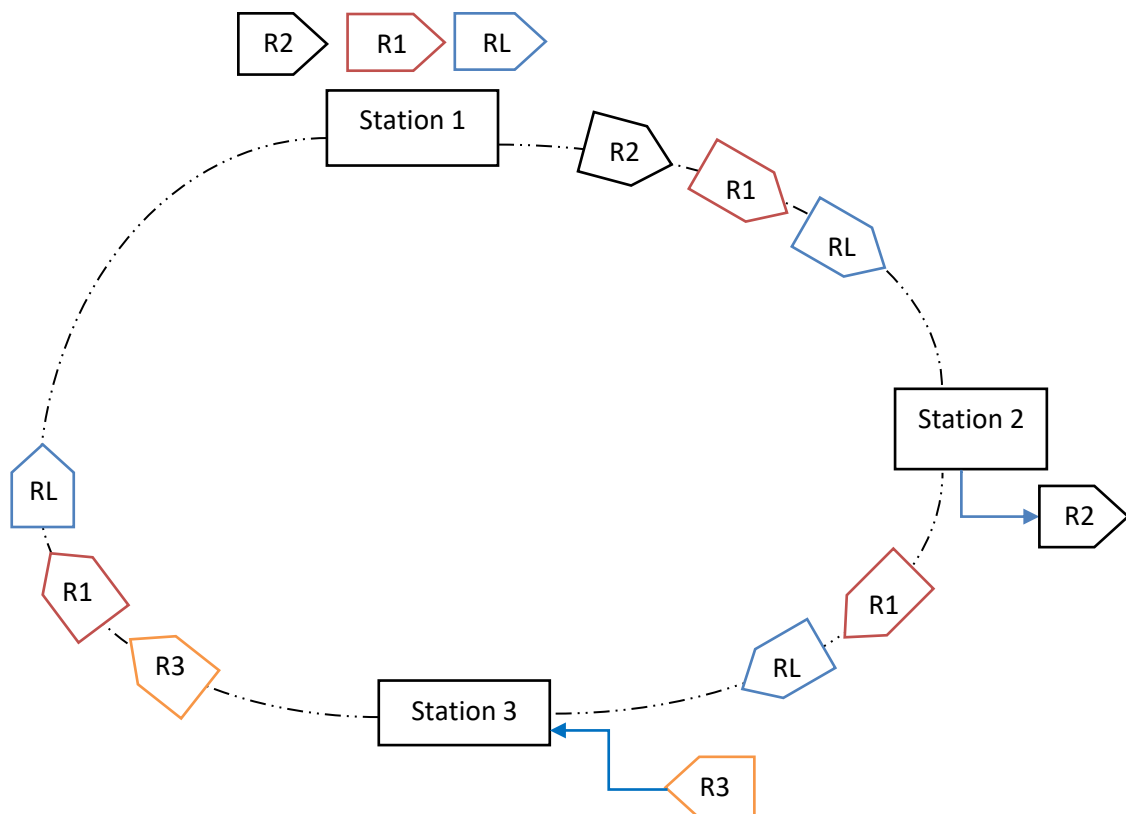


Figure 3.1 : Illustration du suivi de trajectoire par le robot leader avec gestion des robots

III.3. Conception des commandes pour le contrôle et gestion du train de robot

III.3.1 Calcul de la fonction de commande pour le robot leader

Le robot leader suivre sa trajectoire de consigne par une commande de type routeur d'état linéarisante tel que le système linearisé est commandé une commande de type Proportionnel Intégral Dérive Multiple (PIDM) temporel.

Cette commande peut être calculée comme suit:

Soit le robot unicycle décrit par l'équation d'état suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = z \cos \theta \\ \dot{y} = z \sin \theta \\ \dot{\theta} = u_1 \\ \dot{z} = u_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

L'objectif est de faire la position de robot $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ suivre la référence $w(t) = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30 \sin(0.1t) \\ 20 \cos(0.1t) \end{bmatrix}$.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \cos \theta \\ z \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z} \cos \theta - z \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{z} \sin \theta + z \dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \cos \theta - z u_1 \sin \theta \\ u_2 \sin \theta + z u_1 \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \Rightarrow r = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

Calcul de $\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$

Pour un degré relatif $r = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$ le dynamique d'erreur stable d'ordre 2 peut être choisir de la forme suivante:

$$\begin{cases} \ddot{e}_x + 2\dot{e}_x + e_x = 0 \\ \ddot{e}_y + 2\dot{e}_y + e_y = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\ddot{w}_x - \ddot{x}) + 2(\dot{w}_x - \dot{x}) + (w_x - x) = 0 \\ (\ddot{w}_y - \ddot{y}) + 2(\dot{w}_y - \dot{y}) + (w_y - y) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\ddot{w}_x - v_1) + 2(\dot{w}_x - z \cos \theta) + (w_x - x) = 0 \\ (\ddot{w}_y - v_2) + 2(\dot{w}_y - z \sin \theta) + (w_y - y) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = \ddot{w}_x + 2(\dot{w}_x - z \cos \theta) + (w_x - x) \\ v_2 = \ddot{w}_y + 2(\dot{w}_y - z \sin \theta) + (w_y - y) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{w}_x + 2(\dot{w}_x - z \cos \theta) + (w_x - x) \\ \ddot{w}_y + 2(\dot{w}_y - z \sin \theta) + (w_y - y) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

III.3.2. Calcul de la fonction de commande pour les robots suiveurs

Le robot suiveur suit le robot leader par une commande de type routeur d'état linéarisante tel que le système linéarisé est commandé une commande de type mode glissant.

Chaque robot peut être considéré comme un robot leader pour le robot qui le suit.

Soit le robot unicycle décrit par l'équation d'état suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = z \cos \theta \\ \dot{y} = z \sin \theta \\ \dot{\theta} = u_1 \\ \dot{z} = u_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

L'objectif est de faire la position de robot $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ suivre la référence $w(t) = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix}$.

La référence $w(t) = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix}$ est calculée à partir des positions du robot leader $\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix}$ et la distance désirée entre le robot leader et le robot suiveur 'a'.

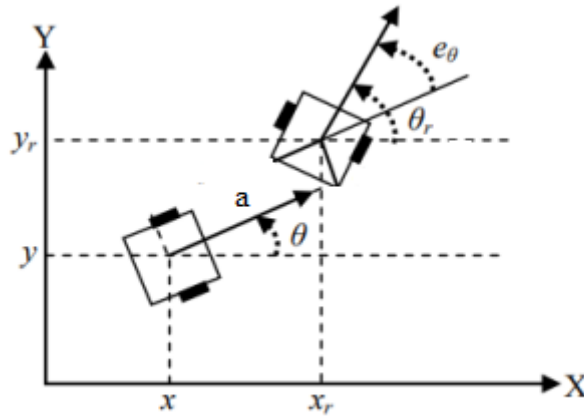


Figure 3.2 Position relative entre le robot leader et le robot suiveur

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \cos \theta \\ a \sin \theta \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a \cos \theta \\ a \sin \theta \end{bmatrix}$$

La commande peut être calculée comme suit:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z \cos \theta \\ z \sin \theta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{z} \cos \theta - z \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{z} \sin \theta + z \dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \cos \theta - z u_1 \sin \theta \\ u_2 \sin \theta + z u_1 \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \Rightarrow r = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

Calcul de $\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$

Pour un degré relatif $r = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$ la surface glissante est un dynamique d'erreur stable d'ordre 1 peut être choisit de la forme suivante:

$$\begin{cases} s_1(x) = \dot{e}_x + e_x = 0 \\ s_2(x) = \dot{e}_y + e_y = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_1(x) = (\dot{w}_x - \dot{x}) + (w_x - x) = 0 \\ s_2(x) = (\dot{w}_y - \dot{y}) + (w_y - y) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_1(x) = (\dot{w}_x - z \cos \theta) + (w_x - x) = 0 \\ s_2(x) = (\dot{w}_y - z \sin \theta) + (w_y - y) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = k_1 * \text{sign}(s_1(x)) \\ v_2 = k_2 * \text{sign}(s_2(x)) \end{cases}$$

Pour $k_1 = k_2 = 50$:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \sin \theta & \cos \theta \\ z \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 50 * \text{sign}((\dot{w}_x - z \cos \theta) + (w_x - x)) \\ 50 * \text{sign}((\dot{w}_y - z \sin \theta) + (w_y - y)) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

III.3.3. Gestion du train (ajout et retrait de robots à chaque station)

Dans certaines applications, il est possible d'ajouter un nouveau robot au train ou d'en retirer un à des points précis (stations).

La gestion du train par l'ajout et la suppression de robots s'effectue à l'aide d'une stratégie basée sur le principe d'une pile d'assiettes LIFO (Last-In, First-Out).

La commande des robots concernés par l'ajout ou la suppression ce fait par la commande présentée dans l'équation (3.4) avec le remplacement de la référence $\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix}$ par une nouvelle référence liées aux stations.

III. 4. Résultats et simulations

Une simulation a été réalisée pour étudier le système proposé. Le robot leader a montré une capacité à suivre la trajectoire avec précision, tandis que le robot suiveur a suivi le leader de manière cohérente. Les résultats ont également démontré la possibilité d'ajouter ou de retirer un robot du train sans perte de stabilité ni collision.

III. 4.1. Simulation du train de robots proposé

La figure suivante illustre le mouvement du robot leader lors du suivi précis et stable d'une trajectoire ovale, reflétant ainsi l'efficacité du système de contrôle dans la direction du robot et le maintien de sa trajectoire de référence.

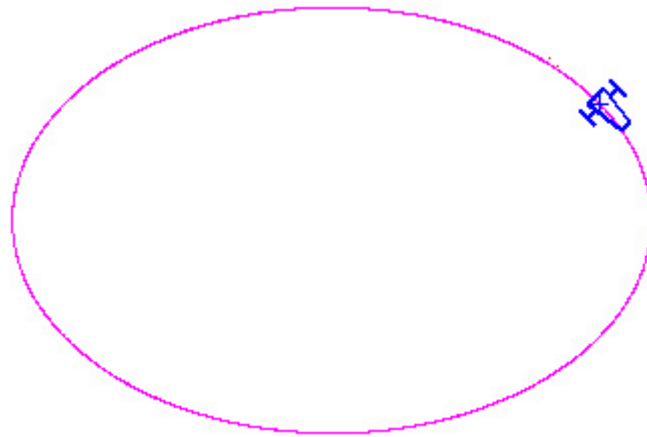


Figure 3.3 : Simulation d'un robot suivant une trajectoire prédéfinie

La figure 3.4 présente l'ajout d'un nouveau robot suivant le robot leader, démontrant ainsi la capacité du système à s'étendre tout en maintenant la précision du suivi et la stabilité du mouvement.

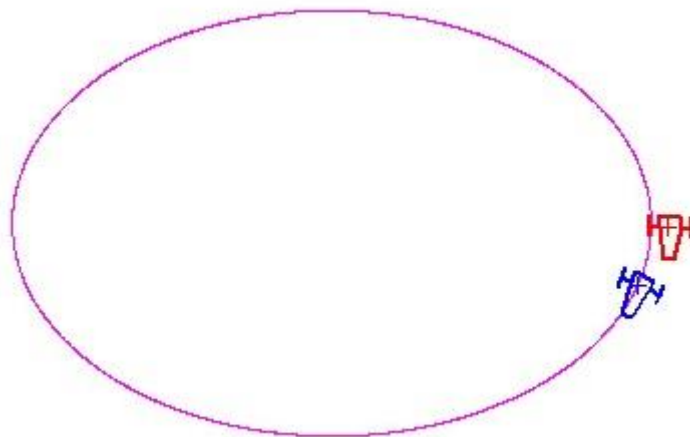


Figure 3.4 : Simulation d'un robot suiveur suivant un robot leader

La figure suivante illustre l'ajout d'un nouveau robot suivant le robot qui suivait déjà le leader, mettant en évidence la capacité du système à étendre le groupe tout en maintenant une coordination séquentielle et organisée du mouvement entre les robots.

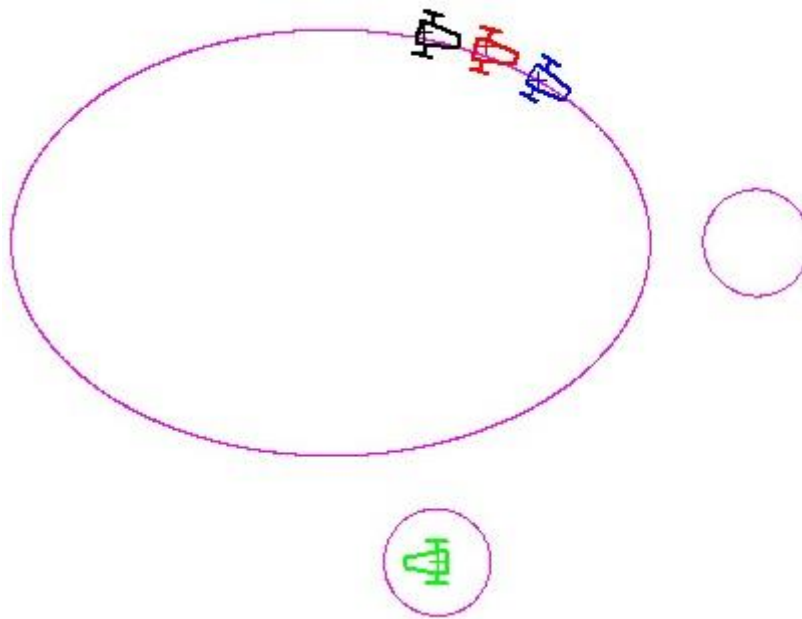


Figure 3.5 : Simulation d'un robot suivant un robot suiveur du robot leader

La figure 3.6 montre l'opération de la suppression d'un robot de la chaîne, tout en maintenant le mouvement du groupe de manière fluide, mettant en évidence la flexibilité du système et sa capacité à conserver la stabilité malgré le changement du nombre de robots.

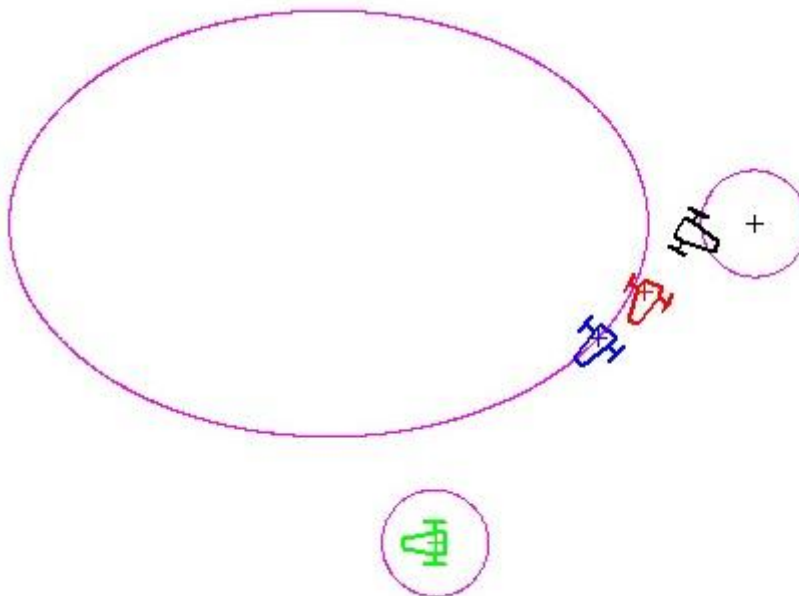


Figure 3.6 : Simulation de la suppression d'un robot du train

Contrôle d'un train de robots

La figure suivante illustre l'ajout d'un nouveau robot au système, démontrant ainsi la capacité du mécanisme de suivi à s'adapter à l'augmentation du nombre de robots sans affecter la stabilité du mouvement.

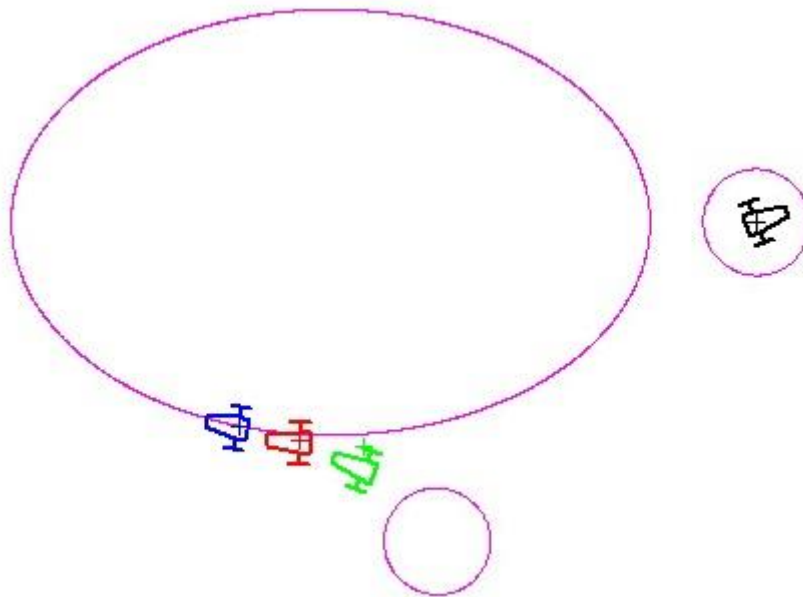


Figure 3.7 : Simulation de l'ajout d'un robot au train

III. 4.2. Evolution de l'erreur de suivi pour le robot leader et les robots suiveurs

La figure suivante montrera l'évolution de l'erreur de suivi d'une trajectoire prédéfinie par le robot leader.

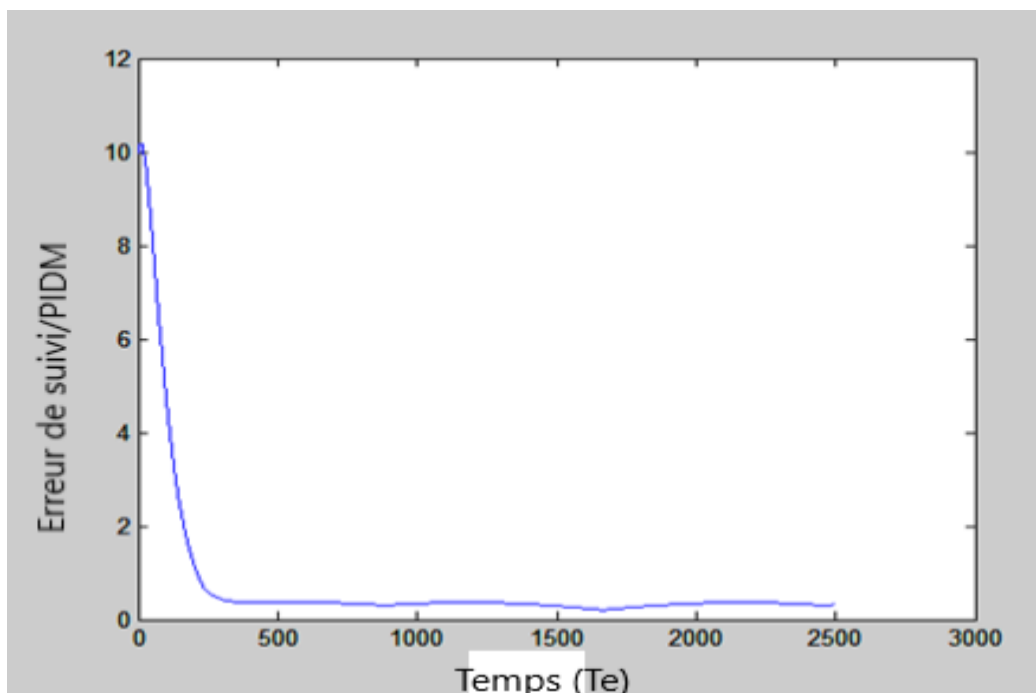


Figure 3.8 Evolution de l'erreur de suivi d'une trajectoire par le robot leader

Contrôle d'un train de robots

La Figure 3.8 illustre l'évolution de l'erreur de suivi sous l'action d'un contrôleur PID.

On observe que l'erreur diminue progressivement dès le début, puis continue à décroître lentement jusqu'à atteindre un état quasi stable.

Ce comportement traduit la nature du régulateur PID, qui offre une réponse plus lisse et moins brusque, mais qui nécessite un temps plus long pour converger vers une erreur faible.

De plus, une erreur résiduelle subsiste au régime permanent, ce qui limite la précision finale du suivi.

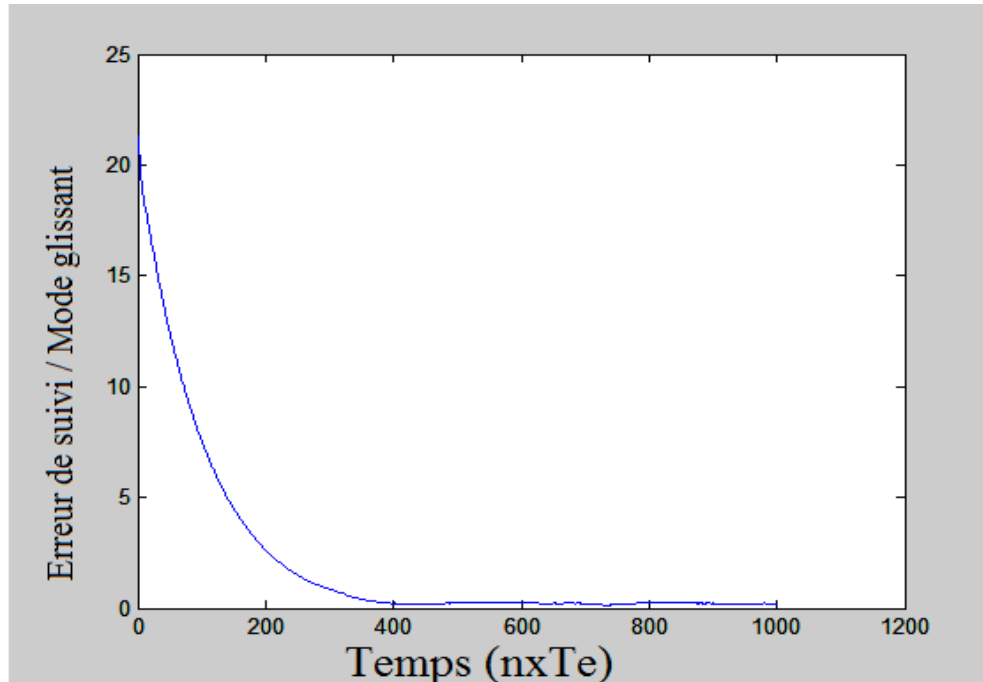


Figure 3.9 Evolution de l'erreur de suivi du robot leader par un robot suiveur

La Figure 3.9 présente l'évolution de l'erreur de suivi lorsque le système est contrôlé par un régulateur en mode glissant.

On remarque que l'erreur chute rapidement dès les premières itérations, atteignant une valeur très faible dans un délai court.

Ce résultat montre que le contrôleur à mode glissant offre une vitesse de convergence élevée et parvient à imposer un suivi précis.

L'erreur au régime permanent est nettement inférieure à celle obtenue avec le PID, malgré la présence éventuelle de petites oscillations (vibration), phénomène typique de cette méthode de contrôle.

III. 4.3. Évolution du signal de commande pour le robot leader et les robots suiveurs

La Figure 3.10 suivante montrera l'évolution du signal de commande de suivi d'une trajectoire prédéfinie par le robot leader:

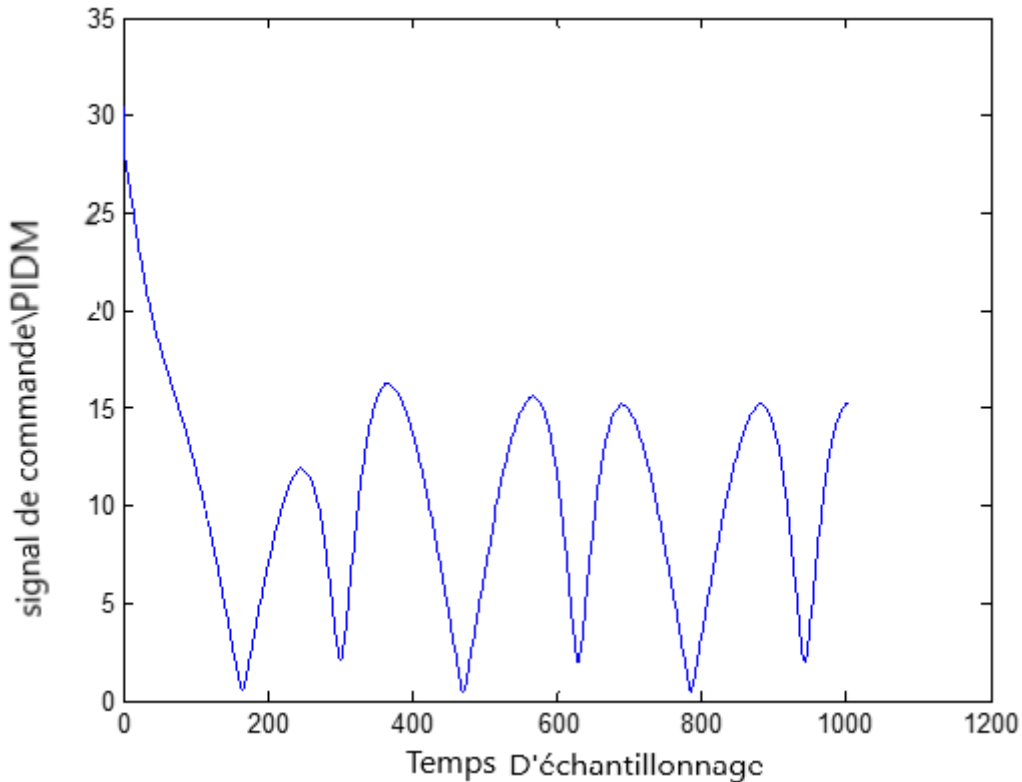


Figure 3.10 Evolution du signal de commande pour le robot leader

Ce graphique illustre l'évolution du signal de commande du PIDM. On remarque un signal plus lisse et régulier par rapport au mode glissant. Les variations sont progressives et sans fortes oscillations, ce qui reflète une meilleure stabilité, mais une réactivité plus faible face aux perturbations.

La Figure 3.11 présente l'évolution **du signal de commande** de suivi lorsque le système est contrôlé par un régulateur en mode glissant.

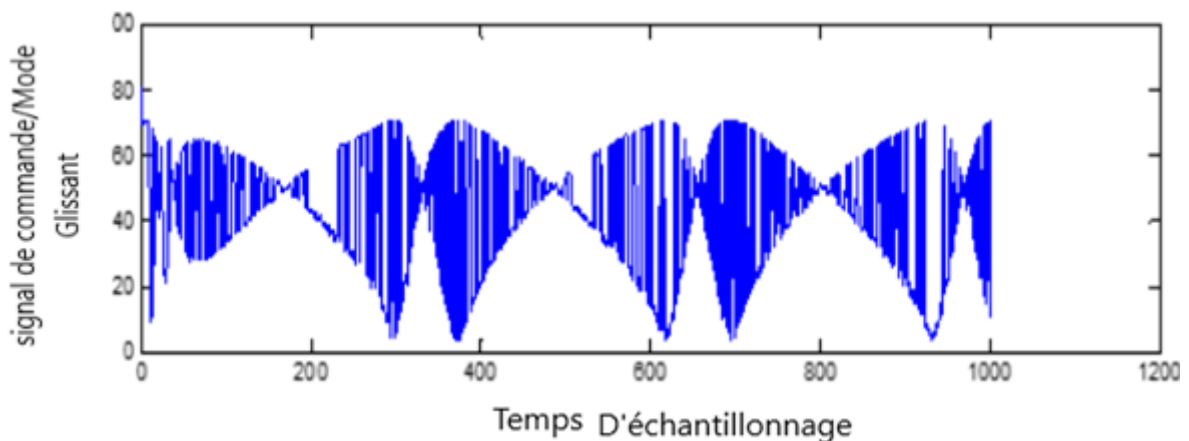


Figure 3.11 Evolution du signal de commande de suivi pour le robot suiveur

La Figure 3.11 présente l'évolution du signal de commande de suivi lorsque le système est contrôlé par un régulateur en mode glissant.

Contrôle d'un train de robots

Ce graphique représente l'évolution du signal de commande en mode glissant. On observe la présence de fortes oscillations rapides, dues au phénomène de broutement. Cela montre que le contrôleur réagit de manière énergique pour compenser les écarts de suivi, ce qui lui confère une réactivité élevée, mais avec un signal peu lisse.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système de contrôle pour un train de robots mobiles en utilisant des algorithmes coopératifs et distribués. Nous avons étudié les fonctions de commande pour le leader et les suiveurs, ainsi que le mécanisme de gestion du train lors de l'ajout ou du retrait de robots. La simulation a démontré l'efficacité du système proposé dans la réalisation des objectifs visés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, nous avons étudié un système de contrôle visant à coordonner le mouvement d'un groupe de robots mobiles suivant un robot leader, formant ainsi un "train de robots".

Nous avons commencé par une étude théorique générale sur la robotique mobile, puis nous avons procédé à la modélisation cinématique du système et à la conception des lois de commande pour le robot leader et les robots suiveurs. L'efficacité des algorithmes proposés a été validée à travers des simulations numériques sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Les résultats obtenus ont montré que le système est capable d'assurer un suivi précis de la trajectoire du leader tout en maintenant la stabilité du groupe, même en cas d'ajout ou de retrait de robots, ce qui témoigne de la flexibilité de l'approche adoptée.

Ce travail constitue une première étape vers le développement de systèmes multi-robots plus intelligents et efficaces. Il ouvre également la voie à des améliorations futures, telles que l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour optimiser la prise de décision, ou l'expérimentation du modèle dans un environnement réel.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., & Kahng, A. B. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4(1), 7–27.
- [2] Desai, J. P., Ostrowski, J. P., & Kumar, V. (2001). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(6), 905–908.
- [3] Oh, K. K., Park, M. C., & Ahn, H. S. (2015). A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 53, 424–440.
- [4] Ren, W., Beard, R. W., & Atkins, E. M. (2005). A survey of consensus problems in multi-agent coordination. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*.
- [5] Halsted, T., Shorinwa, O., Yu, J., & Schwager, M. (2021). Une revue des méthodes d'optimisation distribuées pour les systèmes multi-robots. arXiv <https://arxiv.org/html/2301.11313v3>
- [6] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots* (2nd ed.). MIT Press.
- [7] Nebbad, M., & Lakhdari, A. (2020). Conception et réalisation d'un système de pilotage d'un robot mobile à base d'un micro-contrôleur 80C51 (Mémoire de master). Université Mohamed Boudiaf — M'sila, Algérie.
- [8] Mazzetti, B. (2024, March 15). RPA: Ce que nous apprend l'étymologie du mot "robot". StoryShaper. https://www.storyshaper.io/post/rpa-etymologie-mot-robot_3
- [9] Futura Sciences. (n.d.). Histoire de la robotique : des automates aux premiers robots. Futura Sciences. Retrieved June 10, 2024, from <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/robotique-robotique-a-z-178/page/2/>
- [10] Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE). (2010). *Enjeux et défis de l'industrie de la robotique en Île-de-France*. DRIRE.
- [11] SensoPart. (2025). Robots fixes et mobiles : la comparaison. Info.sensopart. <https://info.sensopart.com/fr/robotics/mobile-vs-stationary-robots#:~:text=Les>
- [12] Si Chaib, C., & Si Tayeb, R. (2022). Conception et réalisation d'un robot mobile suiveur de ligne à base d'Arduino (Mémoire de licence). Université Mohamed Boudiaf — M'sila, Algérie.
- [13] Kaddour, S., & Zanat, S. (2021). Étude et réalisation d'un robot mobile commandé via androïde [Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila]. Faculté de Technologie, Département d'Électronique.
- [14] Lamara, N. (2016). Réalisation d'une commande d'un robot mobile [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. Département d'Automatique, Faculté du Génie Électrique et Informatique.
- [15] Harmonic Drive AG. (n.d.). La robotique mobile — Mobilité et autonomie comme principe directeur de la robotique. Harmonic Drive <https://harmonicdrive.de/fr/glossaire/la-robotique-mobile>

Bibliographie

- [16] Campion, G., Bastin, G., & D'Andrea-Novel, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 47–62.
- [17] Kolmanovsky, I., & McClamroch, N. H. (1995). Developments in nonholonomic control problems. *IEEE Control Systems Magazine*, 15(6), 20–36.
- [18] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- [19] Utkin, V. I. (1992). *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer.
- [20] Samson, C. (1995). Control of chained systems: Application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(1), 64–77.
- [21] Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press.
- [22] Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F., & Noguchi, T. (1990). A stable tracking control method for an autonomous mobile robot. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 384–389.
- [23] Fierro, R., & Lewis, F. L. (1998). Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9(4), 589–600.
- [24] Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems* (3rd ed.). Springer.
- [25] De Luca, A., Oriolo, G., & Samson, C. (1998). Feedback control of a nonholonomic car-like robot. In *Robot Motion Planning and Control* (pp. 171–253). Springer.
- [26] Jiang, Z. P., & Nijmeijer, H. (1997). Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping. *Automatica*, 33(7), 1393–1399.
- [27] Slotine, J. J. E., & Sastry, S. (1983). Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces. *International Journal of Control*, 38(2), 465–492.
- [28] Edwards, C., & Spurgeon, S. K. (1998). *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. Taylor & Francis.
- [29] Bernard B. (2010). Robotique mobile. Cours Télécom Physique Strasbourg, *Université de Strasbourg*.
- [30] Moreno, J. A., & Osorio, M. (2012). A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers. In *2012 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2856–2861.
- [31] Yang, G., & Kim, J. (1999). Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2989–2994.
- [32] Desai, J. P., Ostrowski, J. P., & Kumar, V. (1998). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), 905–917.
- [33] Lewis, M. A., & Tan, K. H. (1997). High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 4(4), 387–403.

Bibliographie

- [34] Balch, T., & Arkin, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), 926–939.
- [35] Consolini, L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., & Tosques, M. (2008). Leader–follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints. *Automatica*, 44(5), 1343–1349.
- [36] Ren, W., & Beard, R. W. (2008). *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*. Springer.
- [37] Olfati-Saber, R., & Murray, R. M. (2004). Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9), 1520–1533.
- [38] Swaroop, D., & Hedrick, J. K. (1996). String stability of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(3), 349–357.
- [39] Peppard, L. (1974). String stability of relative-motion PID vehicle control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(5), 579–581.
- [40] Murray, R. M. (2007). Recent research in cooperative control of multivehicle systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129(5), 571–583.
- [41] Barooah, P., Mehta, P. G., & Hespanha, J. P. (2009). Mistuning-based control design to improve closed-loop stability of vehicular platoons. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(9), 2100–2113.
- [42] Zheng, Y., Li, S. E., Wang, J., Cao, D., & Li, K. (2016). Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 14–26.
- [43] Wang, P. K. C. (1991). Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation. *Journal of Robotic Systems*, 8(2), 177–195.
- [44] Balch, T., & Hybinette, M. (2000). Social potentials for scalable multi-robot formations. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 73–80.
- [45] Fredslund, J., & Matarić, M. J. (2002). A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5), 837–846.