

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الأوتوماتيك و الإلكترونيات
Département d'Automatique et d'Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Automatique

Spécialité :

Automatique et informatique industrielle

Présenté par :

MISSOUM Kenza

&

MEDJBOUR Tarek

Control de Formation de Robot Mobile

Proposé par : - Pr.Z.A. Benselama

- Mme Yous Imen

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

nous remercions encadreur Benslama.Z pour son encadrement exceptionnel, ses conseils avisés et sa disponibilité sans faille. Ses remarques pertinentes et son soutien indéfectible ont été d'une grande aide tout au long de cette recherche.

nous remercions également co-promtrice Youss.I pour propositions utiles et leur bienveillance. Leurs retours ont été précieux pour affiner et enrichir notre travail.

Nos remerciements s'étendent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicace

C'est avec une grande émotion, Je dédie ce modeste travail de fin d'étude :

mon parents, dont l'amour, le soutien et les encouragements constants ont été ma plus grande source de motivation.

A toute ma famille, pour leur soutien, patience, ainsi pour leurs conseils, que dieux les protèges et les entoure de bénédiction.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je vous exprime ma profonde gratitude.

Missoum kenza

Dédicace

À mes parents, pour leur soutien inconditionnel et leur amour sans faille tout au long de cette aventure académique.

À mes frères et mes amis, pour leurs encouragements et leur compréhension durant les moments de doute et de fatigue.

À Mr Z. Benslama et Mme I. Yous, pour leur savoir, leur patience et leur inspiration.

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont accompagné de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

Medjbour tarek

Résumé : Le contrôle collaboratif des systèmes multi-robots est un domaine de recherche qui s'est développé rapidement ces dernières années en raison de son large éventail d'applications dans divers domaines tels que le sauvetage, le déplacement d'objets volumineux, la surveillance, les réseaux de capteurs et le transport collaboratif. Le travail proposé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la collaboration multi-robots, incluant le contrôle d'un groupe de robots mobile pour former une formation basés sur l'approche leader-suiveur, c'est-à-dire comment définir les commandes de mouvement de chaque robot du groupe pour que effectuer les tâches de manière coordonnée et surtout comment garder la formation: assuré une configuration géométrique lors de la navigation du groupe.

Mot clés : contrôle coopératif, SMA , la approche leader-suiveur , PID.

Abstract: Collaborative control of multi-robot systems is a field of research that has developed rapidly in recent years due to its wide range of applications in various fields such as rescue, movement of large objects, monitoring, sensor networks and collaborative transport. The work proposed in this thesis is part of multi-robot collaboration, including the control of a group of mobile robots to form training based on the leader-suitor approach, i.e. how to define the movement controls of each robot in the group so that the tasks are carried out in a coordinated way and especially how to keep the training: ensured a geometric configuration when navigating the group.

Keywords : cooperative control ,MAS , leader-follower approach , PID .

ملخص : التحكم التعاوني في أنظمة الروبوتات المتعددة هو مجال بحث تطور بسرعة في السنوات الأخيرة بسبب مجموعة واسعة من التطبيقات في مجالات مختلفة مثل الإنقاذ وحركة الأجسام الكبيرة والمراقبة وشبكات الاستشعار والنقل التعاوني. العمل المقترح في هذه الأطروحة هو جزء من التعاون متعدد الروبوتات، بما في ذلك التحكم في مجموعة من الروبوتات المتنقلة لتشكيل تدريب على أساس نهج القائد-التابع، أي كيفية تحديد ضوابط الحركة لكل روبوت في المجموعة بحيث يتم تنفيذ المهام بطريقة منسقة وخاصة كيفية الحفاظ على التدريب: ضمان تكوين هندسي عند التنقل في المجموعة.

كلمات مفتاحية : السلوك التعاوني , نهج القائد التابع , أنظمة متعددة الروبوتات , PID .



Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des figures :..... | I |
| Liste des acronymes et abréviations | II |
| Introduction Générale | 1 |
| Chapitre 1 : généralité de robot mobile | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Robot mobile | 3 |
| 1.2.1 Système multi-robot | 3 |
| 1.2.2 Domaine utilisation de système Multi-Robot | 5 |
| 1.3 Contrôle coopératif | 6 |
| 1.3.1 Les stratégies de coopérations | 7 |
| 1.3.2 Systèmes Multi-agents | 10 |
| 1.3.2.1 MAS caractéristiques | 10 |
| 1.3.3 Classes de contrôle et de coordination de la formation | 11 |
| 1.3.4 Contraintes non holonomes | 12 |
| a Aucun glissement latéral | 13 |
| b Roulement sans glissement | 13 |
| 1.4 Robot Mobile Type Hilare | 14 |
| 1.5 Contrôleur PID | 14 |
| 1.5.1 Effet des différentes parties de la régulation PID | 15 |
| 1.5.2 Interprétations des termes | 15 |
| 1.5.3 La conception d'un contrôleur PID | 16 |
| 1.6 Conclusion | 17 |
| Chapitre 2 : Modélisation | 19 |
| 2.1 Introduction | 19 |
| 2.2 Robot mobile de type unicycle | 19 |
| 2.2.1 Modélisation du robot mobile de type unicycle | 19 |
| 2.3 Contrôle de formation leader-suiveur | 21 |
| 2.3.1 L'erreur dans la formation leader-suiveur | 23 |
| 2.4 Conclusion | 23 |
| Chapitre 3 : Simulation | 25 |
| 3.1 Introduction | 25 |
| 3.2 Formation leader-suiveur par control PID | 25 |
| 3.2.1 Organigramme | 25 |
| 3.2.2 trajectoire linéaire | 26 |
| 3.2.3 Trajectoire cercle | 28 |
| 3.2.4 trajectoire étoile | 29 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.2.5 Éviter Obstacle | 30 |
| a- Organigramme | 30 |
| 3.3 Conclusion | 34 |
| Conclusion générale | 35 |
| Bibliographie | 36 |

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : exemple robot mobile..... | 3 |
| Figure 1.2 : groupe de drones..... | 4 |
| Figure 1.3: Formation multi-robots commune: (a) ligne droite; (b) coin; (c) colonne; (d) triangle; (e) double rangée | 4 |
| Figure1. 4: Robot Cup Football (a) exploration planétaire (b) | 5 |
| Figure1.5: recherche et sauvetage (c) | 5 |
| Figure 1.6:Architectures centralisées | 6 |
| Figure 1.7:Architectures décentralisées | 8 |
| Figure 1.8: Nettoyage coopératif..... | 9 |
| Figure 1.9:figure Taxonomie du contrôle coopératif. | 11 |
| Figure 1.10:Caractérisation du roulement sans glissement..... | 13 |
| Figure 1.11:Asservissement par un régulateur PID | 14 |
| Figure 1.12: Décomposition de l'erreur..... | 16 |
| Figure 2.1:Robot mobile de type unicycle | 18 |
| Figure 2.2: Centre instantané de rotation d'un robot de type unicycle..... | 19 |
| Figure 2.3: Formation Leader-Suiveur | 20 |
| Figure 3.1: Parcours ligne des leaders et des suiveurs utilisant le PID | 26 |
| Figure 3.2: les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)..... | 27 |
| Figure 3.3: Parcours circle des leaders et des suiveurs utilisant le PID | 28 |
| Figure 3.4: les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)..... | 28 |
| Figure 3.3: Parcours étoile des leaders et des suiveurs utilisant le PID..... | 29 |
| Figure 3.6: les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)..... | 30 |
| Figure 3.3: Parcours évite obstacle des leaders et des suiveurs utilisant le PID | 30 |
| Figure 3.8: les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)..... | 33 |

Liste des acronymes et abréviations

| | | |
|--------------|----------|--|
| SMR | : | System multi-robot |
| MAS | : | Multi-agent system |
| r.s.g | : | Roulement sans glissement |
| PID | : | proportionnel, intégral, différentiel |
| CIR | : | Centre instantané de rotation |

Introduction Générale :

La robotique est un domaine scientifique qui étudie la conception, la construction, l'opération et l'application de robots. Un robot est un automate doté de capteurs et d'actionneurs lui donnant une capacité d'adaptation et de déplacement proche de l'autonomie. Il existe deux grandes catégories de robots : les robots manipulateurs ancrés physiquement à leur place de travail pour réaliser des tâches précises ou répétitives, et les robots mobiles capables de se déplacer dans un environnement. Les principaux domaines d'utilisation de la robotique sont :

- L'industrie : c'est le secteur de prédilection de la robotique, avec des robots soudeurs, peintres, etc. sur les chaînes d'assemblage.
- L'armée : les véhicules autonomes sont utilisés pour des missions d'espionnage ou de transport.
- La santé : les robots assistent les médecins et chirurgiens, on parle de chirurgie assistée.
- Le milieu domestique : robots aspirateurs, tondeuses à gazon, etc...
- L'assurance : la transformation digitale pousse ce secteur à se tourner vers la robotique.

Aussi on a la robotique collaborative, également connue sous le nom de robotique coopérative ou cobotique (coopératif robot) qui est un domaine de la robotique qui se concentre sur le développement de robots capables de travailler en collaboration avec des opérateurs humains. Ces robots, appelés cobots, sont conçus pour être plus précis, plus cohérents et plus adaptables que les robots traditionnels, ce qui les rend idéaux pour des applications industrielles et manufacturières où la précision et la sécurité sont essentielles

Ce travail implique le contrôle coopératif d'un système robotique composé de plusieurs robots autonomes. C'est-à-dire comment définir des commandes de mouvement pour chaque robot du groupe afin d'effectuer la tâche de manière à maintenir la formation : maintenir la configuration géométrique tout en navigant le groupe dans son environnement.

Pour présenter notre mémoire clairement nous commencerons par

Le chapitre 1 où nous allons introduire les généralités sur le système multi-robots,

D'abord en commencera par les définitions et les domaines d'utilisations, ensuite le contrôle coopératif et leur stratégie associé aux systèmes multi agent et à la fin on définira les robots mobiles de type Hilare et le contrôleur PID.

Ensuite dans le chapitre 2 nous allons présenter la modélisation des robots mobiles unicycle et le contrôle de formation leader-suiveur.

Celle-ci sera suivi par le chapitre 3 qui sera dédié aux présentations des résultats de simulation des approches du deuxième chapitre. Nous verrons plusieurs simulations pour mieux tester la performance de situation.

A la fin nous terminerons par une conclusion et perspective

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous fournirons les principaux concepts de la robotique en particulier les méthodes et applications clés liées aux robots mobiles et au contrôle coopératif. Nous expliquerons après le modèle cinématique et le modèle mathématique du robot mobile utilisé dans cette étude qui n'est autre que le robot mobile de type Hilare.

1.2 Robot mobile :

Un robot mobile est un robot capable de se déplacer de manière autonome dans son environnement. Pour ce faire, le robot doit être capable de naviguer, et la portée et la précision de navigation requises, Dépend de la taille du robot et de son type de tâche. [1][3]



Figure 1.1 : exemple robot mobile

1.2.1 Système multi-robot :

Un système multi-robot est constitué de robots autonomes qui s'associent pour accomplir une tâche ou un ensemble de tâches. Ces robots peuvent communiquer entre eux et coordonner leurs actions pour atteindre des objectifs communs de manière efficace et robuste.

Plusieurs avantages potentiels peuvent être obtenus en utilisant un système multi-robot (MRS). En utilisant un système à robot unique :

- Un SMR a amélioré la répartition spatiale.
- Un SMR peut augmenter le rendement global du système (plus rapide).
- Un SMR introduit une robustesse qui peut bénéficier de la fusion des données et du partage d'informations entre les robots

- Un SMR peut réduire le coût en utilisant un ensemble de robots simples par rapport à un seul robot puissant.
- Un SMR peut améliorer la fiabilité, la flexibilité, l'évolutivité et la polyvalence du système. [11]

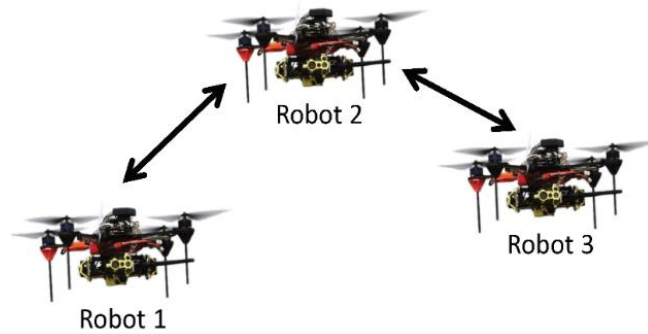


Figure 1.2 : groupe de drones

Différents facteurs influencent le type de système multi-robots, tels que la coordination, la communication et la répartition des tâches entre les robots. Certains types courants incluent les systèmes centralisés, décentralisés et distribués. Chaque méthode présente ses propres avantages et inconvénients en fonction des besoins de la situation spécifique. [8]

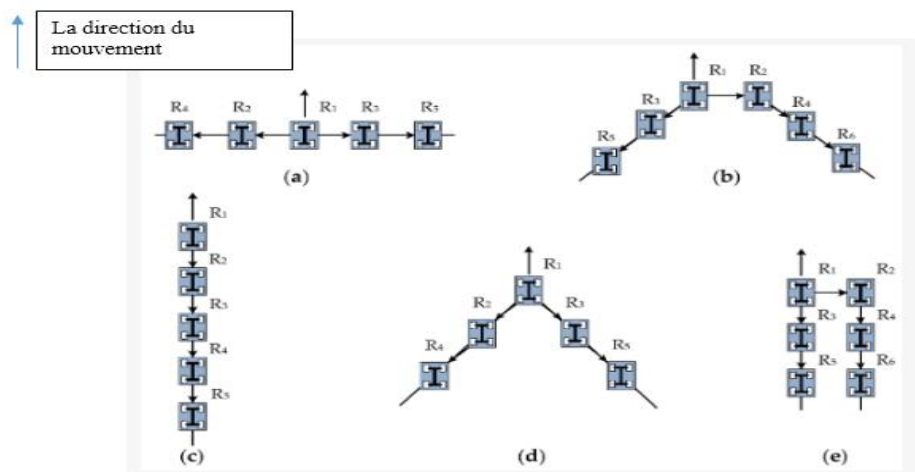


Figure 1.3: Formation multi-robots commune: (a) ligne droite; (b) coin; (c) colonne; (d) triangle; (e) double rangée.

1.2.2 Domaine utilisation de système Multi-Robot :

L'un des principaux objectifs de l'utilisation des robots est de remplacer ou d'assister les humains dans l'exécution de certaines tâches. Cela s'avère particulièrement bénéfique pour les activités dangereuses telles que :

Tâches dangereuses :

- L'exploration spatiale et sous-marine.
- L'inspection de l'intérieur d'installations nucléaires.
- Les missions de surveillance ennuyeuses.

Automatisation des tâches :

Les robots peuvent automatiser de nombreuses tâches, ce qui les rend très utiles dans des domaines comme la défense. Cependant, les robots ne se limitent pas à une simple automatisation, ils peuvent également faire preuve d'une certaine forme d'intelligence.

- **Robots industriels** : Des robots industriels sont développés pour intervenir Milieu dangereux (nucléaire), ils sont également utilisés pour transporter des charges lourdes, Robots de peinture et de soudage dans l'industrie automobile, recommandés Pour les tâches répétitives et précises.

- **Robots militaires** : Les robots militaires sont des robots autonomes ou télécommandés conçus pour des applications militaires. Ces robots peuvent tirer avec plus de précision et plus difficilement à tuer que les soldats. Le déminage consiste à découvrir des mines terrestres et à les éliminer sans faire de victimes. Humanité De plus, cela présente des avantages du point de vue économique car les robots ne nécessitent aucune formation car ils peuvent être des logiciels, ils n'ont pas besoin de nourriture ni de soins médicaux, mais ils ont aussi besoin de prix Les robots de guerre sont trop gros, nous avons des exemples de dragueurs de mines Parce que notre objectif est de comparer nos différentes stratégies de collaboration Nous choisissons le mobile comme domaine d'application : Le déminage est une série d'opérations visant à éliminer les mines terrestres ou marines. [4]



Figure 1.4: Robot Cup Football (a) exploration planétaire (b)

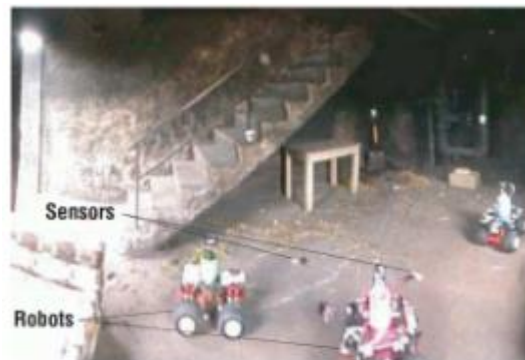


Figure 1.5 : recherche et sauvetage (c)

1.3 Contrôle coopératif :

Le concept de contrôle coopératif dans les systèmes multi-robots implique des stratégies de contrôle coopératif et de coordination entre plusieurs robots. Ces systèmes nécessitent une coordination et une communication entre les robots pour atteindre efficacement des objectifs communs. Les stratégies de contrôle coopératif visent à stabiliser le mouvement collectif, à permettre un mouvement synchronisé et à faciliter les tâches difficiles à accomplir par les robots seuls, Les algorithmes de consensus jouent un rôle crucial dans les systèmes multi-robots, servant de règles d'interaction qui facilitent l'accord sur des objectifs partagés en fonction de l'état de tous les agents impliqués

En résumé, l'objectif du contrôle coopératif des robots mobiles est de faciliter le travail ensemble d'un groupe de robots en combinant leurs capacités de décision, de réaction et de mouvement afin d'accomplir des missions dans des environnements divers et dynamiques. [4]

1.3.1 Les stratégies de coopérations :

Les systèmes multi-robots ont récemment reçu beaucoup d'attention dans la communauté scientifique dernières années. Lorsque plusieurs robots travaillent ensemble pour accomplir une même tâche, contrôler le système est plus délicat, surtout lorsque les robots doivent interagir entre eux, c'est-à-dire lorsque leurs actions imposent des contraintes restrictives sur les actions des d'autres robots. On distingue deux grands types d'organisation du contrôle des équipes de robots (Noreils, 1993) : architectures centralisées et architectures décentralisées.

Dans les architectures centralisées, la prise de décision est prise par une entité unique basé sur des informations globales (Parker, 1993).[4]

L'architecture centralisée :

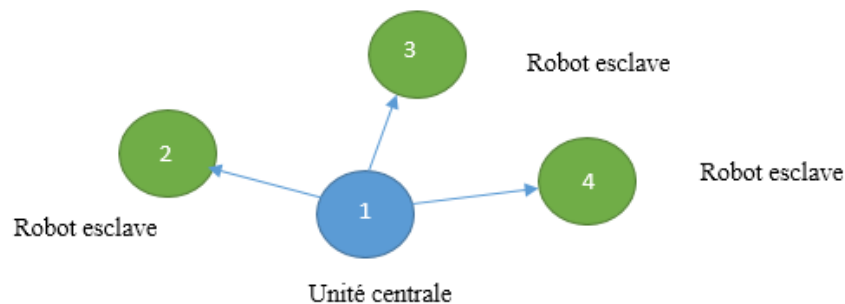


Figure 1.6:Architectures centralisées

- Un seul point de contrôle
- Tous les informations disponibles
- Difficulté de communication
- Un robot supervise quelques autres robots,
- Qui eux-mêmes en supervisent d'autres. . .
- Pyramide de responsabilité
- Besoin de robustesse des niveaux élevés.

Dans les architectures centralisées, un agent de contrôle est responsable des informations concernant l'environnement ainsi que les robots. Cet agent de contrôle communique avec tous les robots pour leur permettre de partager des informations. En cas de dysfonctionnement de l'agent de contrôle central, il est nécessaire de mettre en place un nouvel agent de contrôle

central. L'avantage de cette architecture centralisée est de fournir une vue globale du monde dans lequel les robots évoluent et donc de pouvoir produire des plans globalement optimaux.

Cependant, L'architecture centralisée présente les inconvénients suivants :

- Efficace pour un petit nombre de robots, mais inefficace pour un grand nombre de robots robot.
- Il n'est pas adapté aux environnements dynamiques et aux problèmes qui y sont liés Un échec de communication s'est produit.
- Cela crée un système très fragile. Si l'agent de contrôle échoue Central, il est nécessaire de mettre en place un nouvel agent de contrôle central. Alternativement, l'échec du rétablissement du contrôle central signifie que l'équipe ne fonctionne pas. Dans ce cas, aucune autre tâche ne peut être accomplie.

De nombreuses œuvres littéraires citées dans les sections précédentes entrent dans cette catégorie.

Catégorie de système centralisé L'architecture centralisée est principalement motivée par deux facteurs [Khoshnevis 98] :

- Ambition d'alléger les structures physiques des robots : se débarrasser des capteurs des robots Unité de calcul embarquée et puissante. Réduisant ainsi considérablement leurs coûts.
- Le désir de mieux comprendre l'environnement mondial grâce à des efforts ciblés Des capteurs d'unité centrale qui garantissent de meilleures décisions Par rapport aux robots basés uniquement sur les informations locales fournies par des capteurs embarquement.

Dans ce type d'architecture, le contrôle est délocalisé de la structure physique du robot et se situe au niveau d'une unité centrale ou planificateur central (dans [Noreils 93]) qui gère et garantit l'exécution de la tâche. Dans les architectures de contrôle centralisé, le mode de coordination des actions entre le superviseur et les robots peut être comparé à celui des groupes sociaux, il est également responsable de prendre des décisions pour l'exécution de la tâche globale et de communiquer avec les robots. [4]

Architecture décentralisée

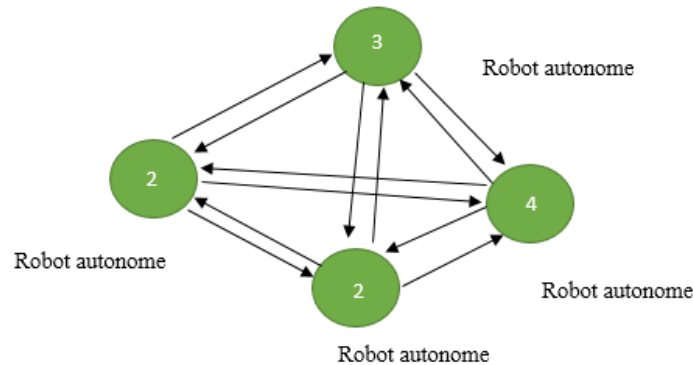


Figure 1.7: Architectures décentralisées

- Informations locales
- Communications locales
- Grande robustesse aux pannes
- Faible réactivité aux changements dans les objectifs du système
- Difficulté à obtenir un comportement global.

Pour les systèmes décentralisés, la difficulté majeure vient du fait que les robots ne connaissent pas toutes les informations sur l'état général du système. L'idée centrale de ce travail est donc de développer une architecture utilisant principalement des informations locales pour faire face aux changements dynamiques de l'environnement, tout en utilisant des informations globales pour coordonner correctement les actions des robots entre eux. Chaque unité ne peut donc pas connaître, à tout moment, l'état des autres robots ainsi que leurs intentions.

Les architectures décentralisées sont divisées en deux catégories : les architectures distribuées et les architectures hiérarchiques.

Les architectures décentralisées répondent mieux aux enjeux environnementaux inconnu ou variable et ont de meilleurs résultats en termes de fiabilité, de flexibilité, adaptabilité et robustesse.

Cependant, les solutions proposées par ce type d'architecture sont souvent sous-optimales. Chaque robot connaît ses propres capacités, a une vision locale du monde grâce à ses capteurs

et une vision des capacités des autres robots grâce à un processus de négociation. De nombreux travaux de la littérature cités dans les sections précédentes appartiennent à cette catégorie de système décentralisé.[4]



Figure 1.8: Nettoyage coopératif

1.3.2 Systèmes Multi-agents :

Un système multi-agents est un système informatique qui permet à plusieurs agents d'interagir les uns avec les autres. Les systèmes multi-agents sont plus adaptés pour résoudre des problèmes complexes, voire impossibles, avec un seul agent.

Les domaines d'application de MAS comprennent : l'évitement des collisions, les applications automobiles, la simulation d'évacuation, l'analyse des urgences, le contrôle collaboratif, la connaissance de la situation, l'exploration de données (images), l'amélioration de la résilience et la gestion de plusieurs robots mono-utilisateur. L'éventail des affiliations d'auteurs couvre une grande partie des organisations travaillant actuellement dans le MAS, ce qui fournit une preuve solide de la généralisation de ce domaine de recherche relativement nouveau. [12]

1.3.2.1 MAS caractéristiques :

Les agents peuvent référencer différents composants car les applications ont des objectifs différents et sont ancrées dans des paradigmes différents. Les agents peuvent être considérés comme faisant partie d'un programme ou d'une entité indépendante. On peut supposer que la plupart des chercheurs devraient généralement être d'accord avec Wooldridge et Jennings, qui

définissent un agent comme un système informatique matériel ou logiciel ayant les propriétés suivantes :

- La réactivité est lorsqu'un agent comprend son environnement et réagit rapidement aux changements qui peuvent se produire.
- L'initiative ne se limite pas à réagir à l'environnement; les agents sont capables de prendre des initiatives et d'adopter un comportement axé sur les objectifs.
- Compétences sociales. Les agents peuvent interagir / communiquer avec d'autres agents (et peut-être des humains) à travers un langage de communication agent spécifique (modèle cognitif) et établir des connexions entre leurs objectifs autonomes et le contexte spatial.

Le concept d'agence est lié à la rationalité. Selon Russell et NORVIG, la rationalité est liée à quatre facteurs :

- Les mesures de performance, qui définissent les critères de réussite.
- La connaissance préalable de l'agent de l'environnement.
- La capacité de l'agent à accomplir des actions.
- L'ordre dans lequel le sujet perçoit.

Celles-ci conduisent à cette définition : Pour chaque perception possible, un agent rationnel doit choisir une action qui maximise sa mesure de performance, compte tenu des preuves fournies par la séquence de perceptions et de toute connaissance interne préalable de l'agent. [12]

1.3.3 Classes de contrôle et de coordination de la formation :

La coopération implique le partage d'informations entre les équipes et les membres grâce à un réseau de communication efficace, ce qui leur permet d'agir en équipe et de réaliser la mission qui leur a été confiée. Un algorithme de décision collaborative favorise la réalisation efficace de la mission et augmente l'efficacité. La faculté de supporter toute erreur pouvant se produire chez un autre membre de l'équipe de robots. le degré de coordination de diverses personnes

On peut classer les véhicules sans pilote de la manière suivante (figure) : très fort, très faible et non coordonné. On peut identifier une coordination solide en se basant sur la manière dont les robots prennent des décisions. De ce point de vue, on distingue deux catégories principales.

Organisation de la coordination de l'équipe, qui comprend un contrôle centralisé et un contrôle distribué/décentralisé, respectivement. [11]

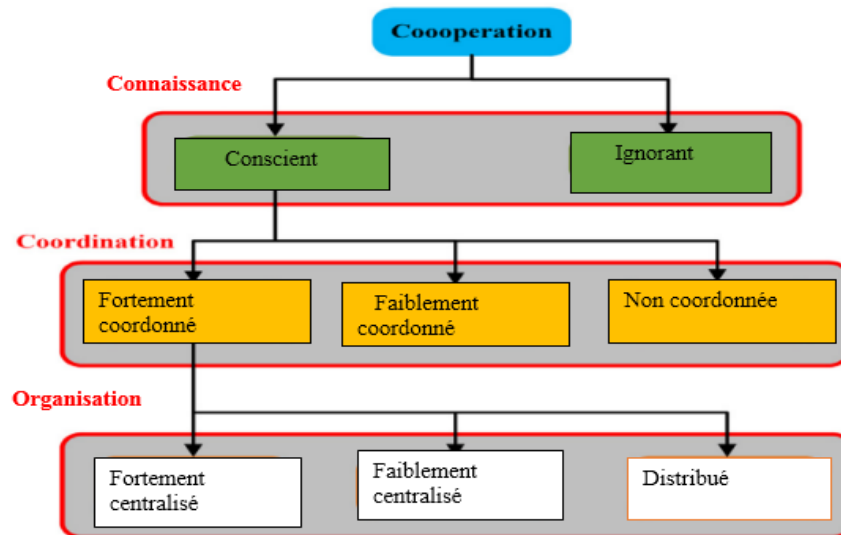


Figure 1.9:figure Taxonomie du contrôle coopératif.

1.3.4 Contraintes non holonomes :

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.[7]

a- 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 $y = 0$. [17]

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

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

Ainsi on obtient :

$$-\dot{x}_A^I \sin\theta + \dot{y}_A^I \cos\theta = 0$$

b- Roulement sans glissement:

La locomotion sur roues exploite la friction entre les roues et le sol, les caractéristiques de mouvement relatif de la roue par rapport au sol sont fortement influencées par la nature du contact (matériau du contact). Dans des conditions optimales. Une roue roule sur le sol sans glissement, ce qui signifie que sa vitesse relative par rapport au sol au point de contact est nulle.

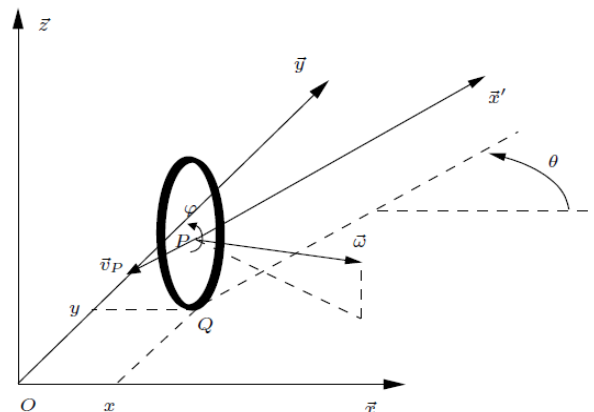


Figure 1.10:Caractérisation du roulement sans glissement

Soit $P(x, y, r)$ le centre de la roue, $Q(x, y, 0)$ le point de contact de la roue avec le sol, Il vient alors :

$$\vec{v}_Q = \vec{v}_p + \vec{\omega} \times \vec{p}_Q = 0 \quad (1.1)$$

$$\dot{x}\vec{x} + \dot{y}\vec{y} + \left(\dot{\theta}\vec{z} + \dot{\phi}(\vec{x}\sin\theta - \vec{y}\cos\theta - \vec{y}\cos\theta)\right) \wedge (-r\vec{x}) = \vec{0} \quad (1.2)$$

$$(\dot{x} + r\dot{\phi}\cos\theta)\vec{x} + (\dot{y} + r\dot{\phi}\sin\theta)\vec{y} = \vec{0} \quad (1.3)$$

Ceci nous donne le système de contraintes scalaires :

$$\dot{x} + r\dot{\phi}\cos\theta = 0$$

$$\dot{y} + r\dot{\phi}\sin\theta = 0$$

Que l'on peut transformer pour faire apparaître les composantes de vitesse dans le plan de la roue d'une part et perpendiculairement à la roue d'autre part :

$$-\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta = 0$$

$$\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta = -r\dot{\phi}$$

Ces contraintes traduisent le fait que le vecteur \vec{v}_p soit dans le plan de la roue et ait pour module $r\dot{\phi}$. [1][17]

1.3 Robot Mobile Type Hilare :

Un robot mobile autonome est équipé de deux roues motrices, d'une ou plusieurs roues folles, de nombreux capteurs et systèmes experts, et a la capacité de détecter, d'éviter des obstacles imprévus et de planifier des trajectoires [5][6]

Le robot Hilare a été conçu en 1977 par le Groupe LAAS à des fins de recherche, notamment dans les domaines de la navigation et de la planification de trajectoires.

1.4 Contrôleur PID :

Le contrôleur PID (proportionnel, intégral, différentiel) est un système de régulation (boucle off), il calcule la commande en fonction de l'erreur entre le point de consigne et la sortie.

Son rôle est de s'assurer que la réponse présente des caractéristiques dynamiques et statiques appropriées. [13]

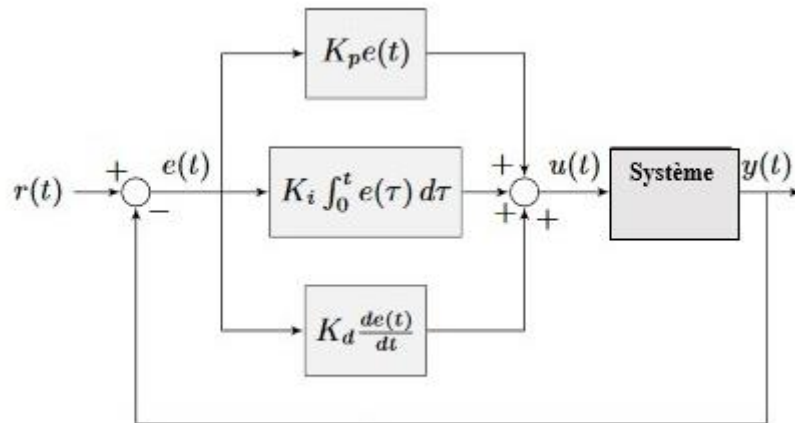


Figure 1.11: Asservissement par un régulateur PID

1.5.1 Effet des différentes parties de la régulation PID :

- La partie proportionnelle (P) : La part P est la part proportionnelle, ce qui signifie que l'effet dépend uniquement de la différence momentanée entre la valeur de consigne PID et le retour PID. L'inconvénient est que plus la valeur de consigne et la rétroaction se rapprochent, plus la correction est faible. Le comportement de régulation s'en trouve ralenti. En théorie, la valeur de consigne n'est jamais atteinte.

- La partie intégrale (I) : La partie I peut résoudre le problème de la partie P qui n'atteint pas la valeur de consigne. La composante I intègre la différence entre la valeur de consigne et le retour. Même en cas de petites différences, le signal de correction devient, après un certain temps, suffisamment important pour corriger l'erreur entre la valeur de consigne PID et le retour PID.

- La partie dérivée (D) : La composante D résout un autre problème du régulateur P. Comme le signal de correction ne peut jamais être supérieur à la différence entre la valeur de consigne PID et la rétroaction PID, la composante D peut brièvement amplifier cette différence et accélérer ainsi la réaction du régulateur. Mais cela n'est recommandé que si la part P et la part I ne permettent pas d'obtenir un bon comportement de régulation. [16]

1.5.2 Interprétations des termes :

Un contrôleur PID typique implique trois types d'actions de contrôle : une action proportionnelle, une action intégrale et une action dérivée, qui peuvent être exprimées mathématiquement comme suit :

$$u(t) = K_p * e(t) + k_i * \int_0^t e(t)dt + k_d * de(t)/dt \quad (1.4)$$

Où :

- $u(t)$ représente l'action de contrôle à l'instant t ,
- $e(t)$ est l'erreur de contrôle à l'instant t .

Définie comme la différence entre la valeur de consigne et la valeur mesurée K_p , k_i et k_d sont respectivement les gains proportionnel, intégral et dérivé.

L'action de contrôle proportionnelle est proportionnelle à l'erreur de contrôle actuelle, qui peut s'exprimer comme :

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1.5)$$

Où K_p est le gain proportionnel. Puisqu'il met en œuvre l'opération standard d'augmenter l'effort de contrôle lorsque l'erreur de contrôle est grande (avec le signe approprié), la fonction d'un tel contrôle est assez évident.

L'action intégrale est proportionnelle à l'intégrale de l'erreur de contrôle, c'est-à-dire,

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.6)$$

Le terme k_i représente le gain intégral. Avec l'action intégrale, la commande résultante utilise les valeurs passées de l'erreur de commande pour générer son signal de commande.

La commande dérivée prend la forme suivante :

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.7)$$

Où k_d est le gain dérivé, qui utilise les valeurs futures prédites de l'erreur de contrôle.

1.5.3 La conception d'un contrôleur PID :

La différence entre une variable de processus mesurée et le point de consigne souhaité est utilisée par un contrôleur PID pour calculer une valeur d'erreur. Le contrôleur modifie les

entrées de contrôle du processus dans le but de réduire l'erreur. Voici l'équation énoncée pour le contrôle de formation appliqué au contrôleur PID :

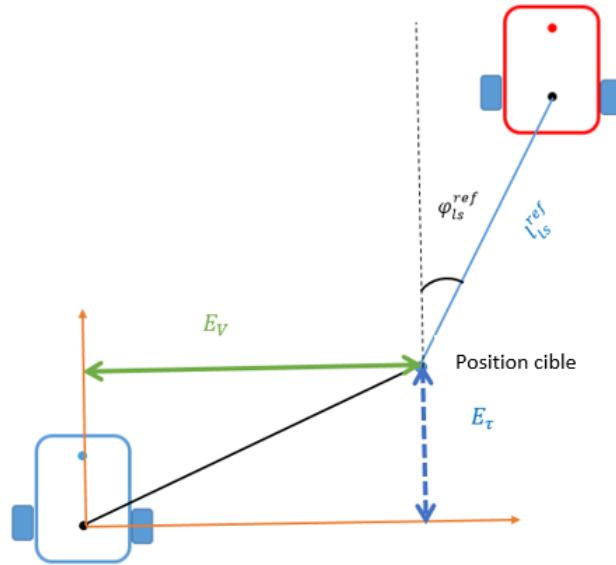


Figure 1.12 : Décomposition de l'erreur

$$v_s = v_l [k_p E_\tau + k_i \sum E_\tau + k_d \Delta E] \quad (1.8)$$

$$\omega_s = k_p E_v + k_i \sum E_v + k_d \Delta E \quad (1.9)$$

L'erreur $e(t)$ est décomposée par rapport à E_τ et E_v comme illustré dans la figure 1.12 :

$$E_\tau = l_{ls} \cos \varphi_{ls} - l_{ls}^d \cos \varphi_{ls}^d \quad (1.10)$$

$$E_v = l_{ls} \sin \varphi_{ls} - l_{ls}^d \sin \varphi_{ls}^d \quad (1.11)$$

1.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les robots mobiles en nous concentrant sur les systèmes multi-robots, leurs domaines d'utilisation et la manière dont les robots collaborent dans de tels systèmes, puisque le but de cette thèse est de mettre en œuvre une architecture de contrôle coopérative. Ou les applications la plus explicite étant formations d'essaims de robots mobiles dans des environnements très fréquentés, nous avons d'abord examiné les différentes

structures de contrôle présentes dans la littérature, qui se divisent en deux architectures centralisée et décentralisée, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

2.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande d'une formation de robots mobiles, où le système est composé d'un leader et plusieurs suiveurs, les trajectoires des suiveurs sont généralement non prédéfinies elles sont décidées par leur leader en temps réel. Nous appliquerons une commande du leader pour suivre une trajectoire que nous définirons et une autre pour les suiveurs afin d'accompagner le leader en temps réel avec des contraintes que nous choisirons.

2.2 Robot mobile 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. [9]

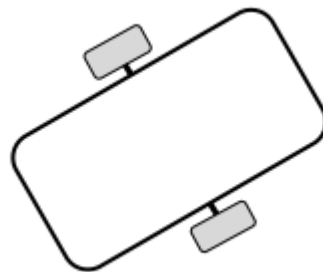


Figure2.1 : Robot mobile de type unicycle

2.2.1 Modélisation du robot mobile de type unicycle :

Centre instantané de rotation (CIR) les roues motrices ayant même axe de rotation, Le Centre instantané de rotation du robot est un point de cet axe, le rayon de courbure de la trajectoire du robot ρ , la vitesse de rotation du robot autour du CIR (vitesse angulaire) ω , la vitesse de roue droite v_d , la vitesse de roue gauche v_g , vitesse longitudinale v , vitesse angulaire de la roue droite $\dot{\phi}_d$, vitesse angulaire de la roue gauche $\dot{\phi}_g$:

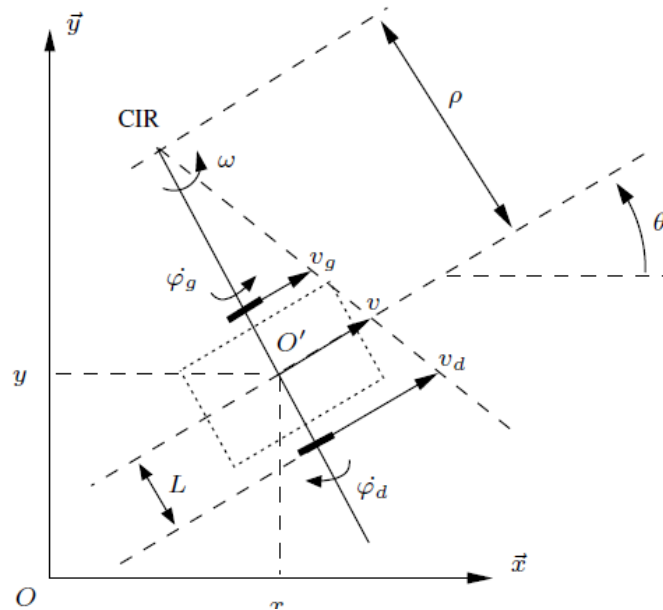


Figure 2.2: Centre instantané de rotation d'un robot de type unicycle

$$vd = -r\dot{\varphi}d = (\rho + L)\omega$$

$$vg = r\dot{\varphi}g = (\rho - L)\omega$$

$$\omega = \dot{\theta} = -\frac{r(\dot{\varphi}d + \dot{\varphi}g)}{2L}$$

$$\rho = \frac{L(\dot{\varphi}d - \dot{\varphi}g)}{\dot{\varphi}d + g}$$

$$v = \frac{vd + dg}{2}$$

- si $\dot{\varphi}d = -\dot{\varphi}g$ le robot se déplace en ligne droites, $\dot{\varphi}d = \dot{\varphi}g$ le robot tourne sur lui-même.

- Le modèle cinématique d'un robot mobile, qui peut être obtenu à partir des contraintes non-holonomes ($[v; \omega]$ la commande de robot), peut être décrit comme :

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

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.3 Contrôle de formation leader-suiveur :

Selon le schéma de contrôle de la formation présenté dans la figure (2.3), le robot mobile p_l suit son leader à robot p_f , la séparation souhaitée l_{ls}^d , le relèvement souhaité φ_{ls}^d , et l'orientation souhaitée θ_s^d et $\theta_{ls}^d = \theta_l^d + \alpha$.

p vecteur de configuration $p = [x, y, \theta]^T$

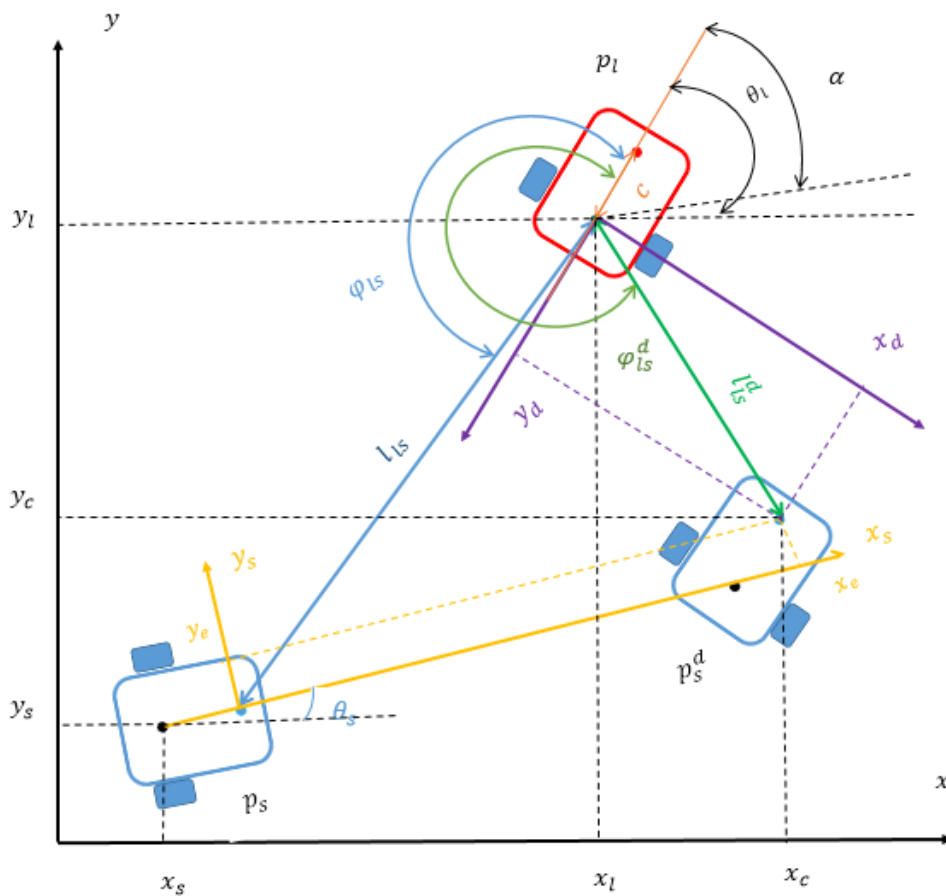


Figure 2.3 : Formation Leader-Suiveur

$$p_s^d = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_l & -\sin\theta_l \\ \sin\theta_l & \cos\theta_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$l_{ls}^d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad \text{et} \quad \varphi_{ls}^d = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) - \theta_l + \pi$$

En utilisant les relations géométriques entre les robots [15], il faut obtenir la position p_f^d du robot suiveur :

$$p_s^d = \begin{bmatrix} x_l - c \cos \theta_l + l_{ls}^d \cos (\varphi_{ls}^d + \theta_l) \\ y_l - c \sin \theta_l + l_{ls}^d \sin (\varphi_{ls}^d + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La posture réelle du suiveur p_f satisfait

$$p_s^r = \begin{bmatrix} x_l - c \cos \theta_l + l_{ls}^r \cos (\varphi_{ls}^r + \theta_l) \\ y_l - c \sin \theta_l + l_{ls}^r \sin (\varphi_{ls}^r + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

En dériver l'équation (2.3) :

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= \dot{x}_l - x_d \dot{\theta}_l \sin \theta_l - y_d \dot{\theta}_l \cos \theta_l \\ \dot{y}_c &= \dot{y}_l + y_d \dot{\theta}_l \cos \theta_l - x_d \dot{\theta}_l \sin \theta_l \\ \\ \dot{x}_c &= v_l \cos \theta_l - x_d \omega_l \sin \theta_l - y_d \omega_l \cos \theta_l \\ \dot{y}_c &= v_l \sin \theta_l + x_d \omega_l \cos \theta_l - y_d \omega_l \sin \theta_l \\ \\ \dot{x}_c &= (v_l - y_d \omega_l) \cos \theta_l - x_d \omega_l \sin \theta_l \\ \dot{y}_c &= (v_l - y_d \omega_l) \sin \theta_l - x_d \omega_l \cos \theta_l \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & -\sin \theta_l \\ \sin \theta_l & \cos \theta_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_l - y_d \omega_l \\ x_d \omega_l \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La distance c (distance de l'essieu arrière à l'avant du robot.), la relation sont présente comme suivant :

$$\begin{aligned} x_{os} &= x_s + c \cos \theta_s \\ y_{os} &= y_s + c \sin \theta_s \end{aligned} \quad (2.7)$$

En dériver l'équation (2.7) :

$$\begin{aligned} \dot{x}_{os} &= v_s \cos \theta_s - c \cdot \omega_s \sin \theta_s \\ \dot{y}_{os} &= v_s \sin \theta_s + c \cdot \omega_s \cos \theta_s \end{aligned} \quad (2.8)$$

En utilisant les équations (2.6), (2.8). L'erreur de suivi pour la formation de leader-suiveur dans le système de coordonnées du suiveur est obtenue.

$$\begin{bmatrix} x_{se} \\ y_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \sin\theta_s \\ -\sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c - x_{os} \\ y_c - y_{os} \end{bmatrix}$$

La distinction principale entre le leader et le suiveur est définie par :

$$\alpha = \theta_l - \theta_s \text{ et } \dot{\alpha} = \omega_l - \omega_s$$

L'objectif est d'atteindre et de maintenir la formation et la stabilité du leader-suiveur, La tâche de contrôle a pour but de créer les entrées de contrôle (v_f, ω_f)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{se} = 0 ; \lim_{t \rightarrow \infty} y_{se} = 0 ; 0 < |\alpha| < \delta \quad (2.9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_s^d - p_s = 0 \quad (2.10)$$

2.3.1 L'erreur dans la formation leader-suiveur :

En supposant que (x_d, y_d) sont des constantes. En utilisant (2.4), (2.6), certaines formules trigonométriques et en dérivant (2.9), l'erreur est obtenue par :

$$x_{se} = x_c \cos\theta_s - x_{os} \cos\theta_s + y_c \sin\theta_s - y_{os} \sin\theta_s \quad (2.11)$$

$$y_{se} = -x_c \sin\theta_s + x_{os} \sin\theta_s + y_c \cos\theta_s - y_{os} \cos\theta_s$$

En dériver (2.11) et remplace \dot{x}_c, \dot{y}_c :

$$\dot{x}_{se} = (v_l - y_d \omega_l) \cos\alpha - x_d \omega_l \sin\alpha - v_s + \omega_s (-x_c \sin\theta_s + x_{os} \sin\theta_s + y_c \cos\theta_s - y_{os} \cos\theta_s)$$

$$\dot{y}_{se} = (v_l - y_d \omega_l) \sin\alpha + x_d \omega_l \cos\alpha - \omega_s (x_c \cos\theta_s - x_{os} \cos\theta_s + y_c \sin\theta_s - y_{os} \sin\theta_s)$$

Sous forme matricielle, l'erreur est :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{se} \\ \dot{y}_{se} \\ \dot{\theta}_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_l - y_d \omega_l) \cos\alpha - x_d \omega_l \sin\alpha - v_s + \omega_s y_e \\ (v_l - y_d \omega_l) \sin\alpha + x_d \omega_l \cos\alpha - \omega_s (c + x_e) \\ \omega_s^d - \omega_s \end{bmatrix}$$

2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons développé des équations cinématiques du robot mobile uni cycle ainsi que L'approche de suivi d'une trajectoire pour un robot mobile non-holonome (Suiveur) en collaboration avec son leader. Le contrôle du suivi pour un seul robot mobile a été développé dans ce chapitre, pour contrôler la formation pour une gamme de robots mobiles

permettant de suivre le leader il nous suffira d'introduire deux contraintes pour chaque suiveur à savoir la distance et l'angle.

3.1 Introduction :

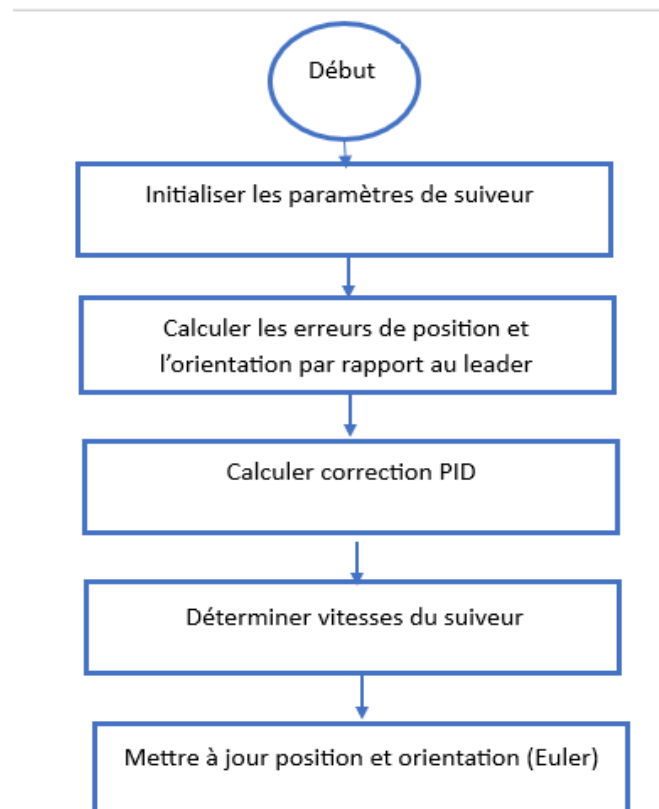
Après avoir étudié la théorie nécessaire pour de formation leader-suiveur à, savoir la modélisation et les lois de commandes essentiel pour répondre à notre objectif, nous passerons dans ce chapitre à l'implémentation de loi de commande et la simulation, pour cela nous utiliserons logiciel Matlab où nous utiliserons différentes trajectoires pour tester l'efficacité de notre contrôleur PID.

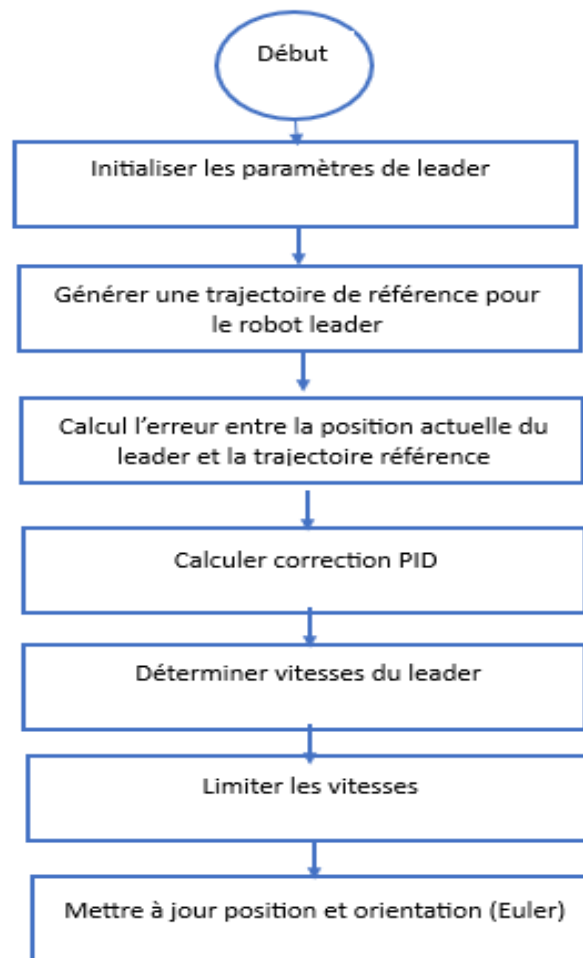
3.2 Formation leader-suiveur par control PID :

Nous simulerons le mouvement leader-suiveur en plusieurs trajectoire, représenter un leader et quatre suiveurs. Supposons que la distance de l'essieu arrière à l'avant du robot soit $c = 0,1$ m, la vitesse linéaire v_l et la vitesse angulaire ω_l du robot leader pour que sa trajectoire soit une ligne droite, la position initiale du robot leader est p_l , la séparation souhaitée l_{ls}^d , le relèvement souhaité $\varphi_{ls}^d = \pi/4$, la fonction de trajectoire x_{Ref} et y_{Ref} .

3.2.1 Organigramme :

Suiveur :



Leader :**3.2.2 trajectoire linéaire :**

$$p_l = [0; 0; 0] ; d_{ls}^d = 0.5m$$

$$x_{Ref} = t ; y_{Ref} = \text{zeros}(\text{size}(t))$$

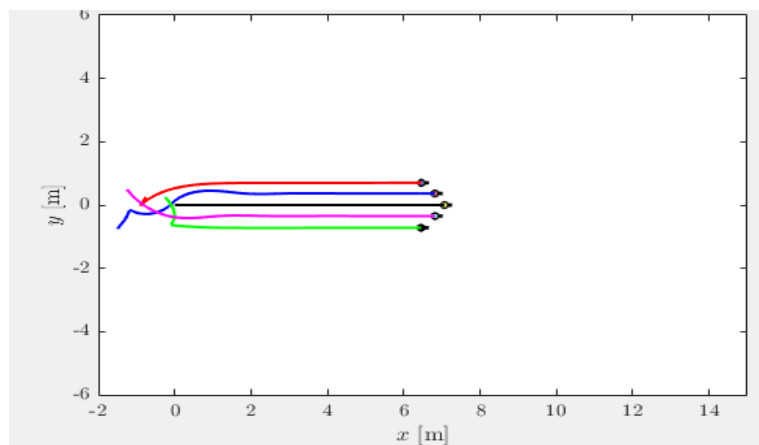


Figure 3.1: Parcours des leaders et des suiveurs utilisant le PID

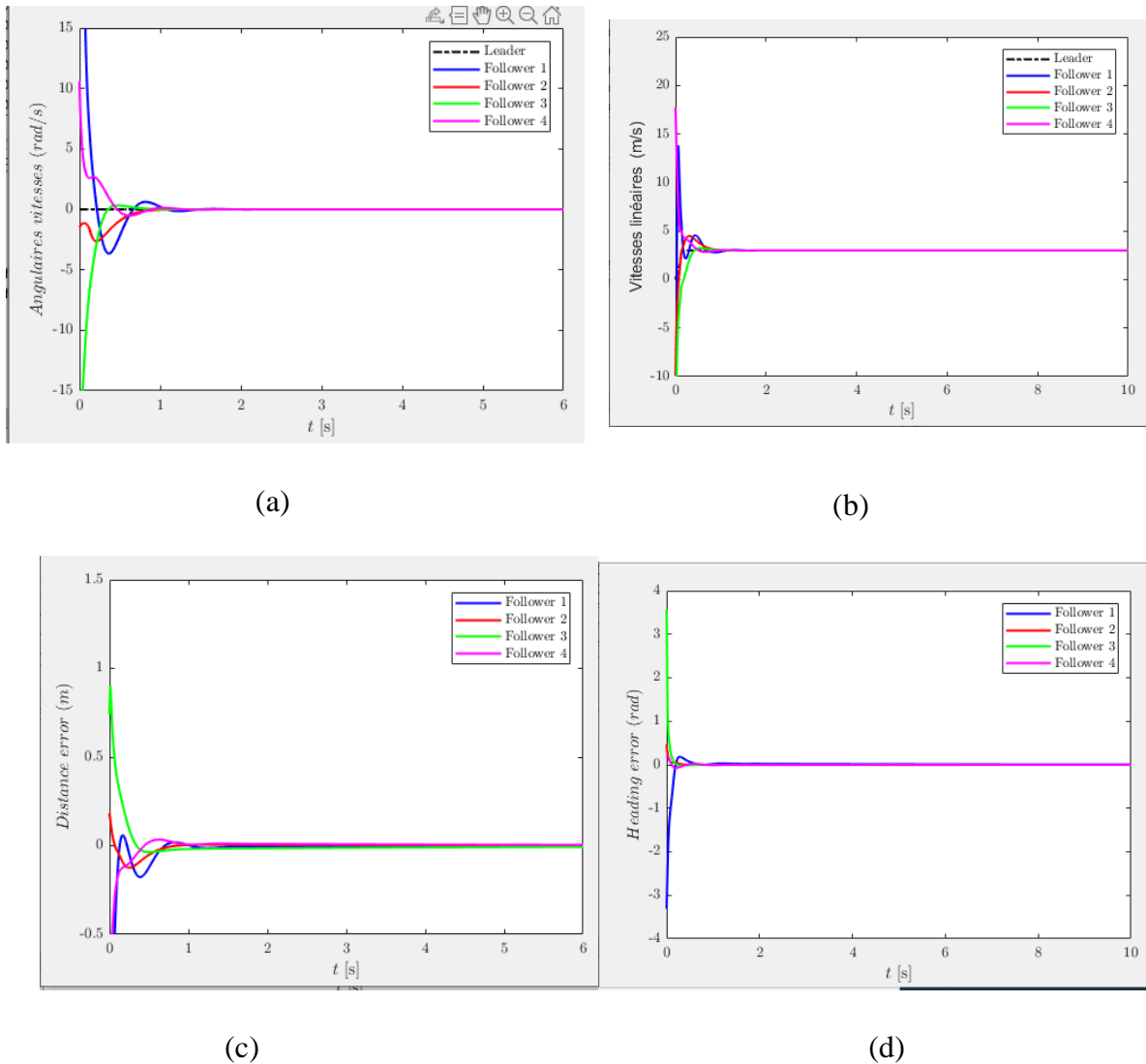


Figure 3.2: les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)

Résultat :

Comme le montre la Figure (3.2), les suiveurs suivent leur leader tout en préservant la bonne séparation et la rotation. La Figure (a) et (b) représente les vitesses linéaire et angulaire des suiveurs, respectivement. Après ($t=1s$), les vitesses des suiveurs atteignent des valeurs constantes. La Figure (c) et (d), qui représente les erreurs de direction et de distance des suiveurs, respectivement, montre comment les erreurs de suivi des suiveurs convergent vers zéro après ($t = 1s$).

3.2.3 Trajectoire cercle :

$$p_l = [3; 0; 0] ; l_{ls}^d = 0.5m$$

$$x_{Ref} = \cos(t) ; y_{Ref} = \sin(t)$$

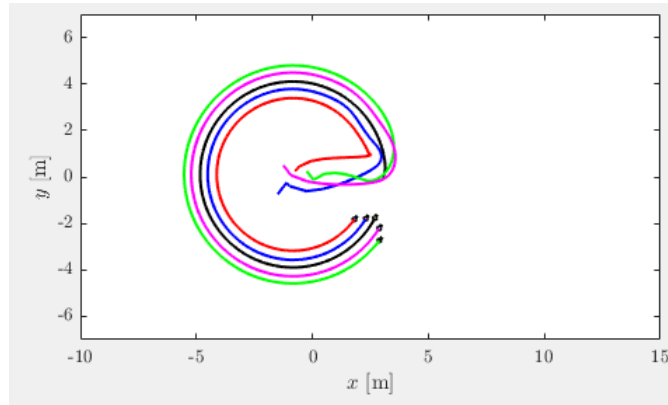
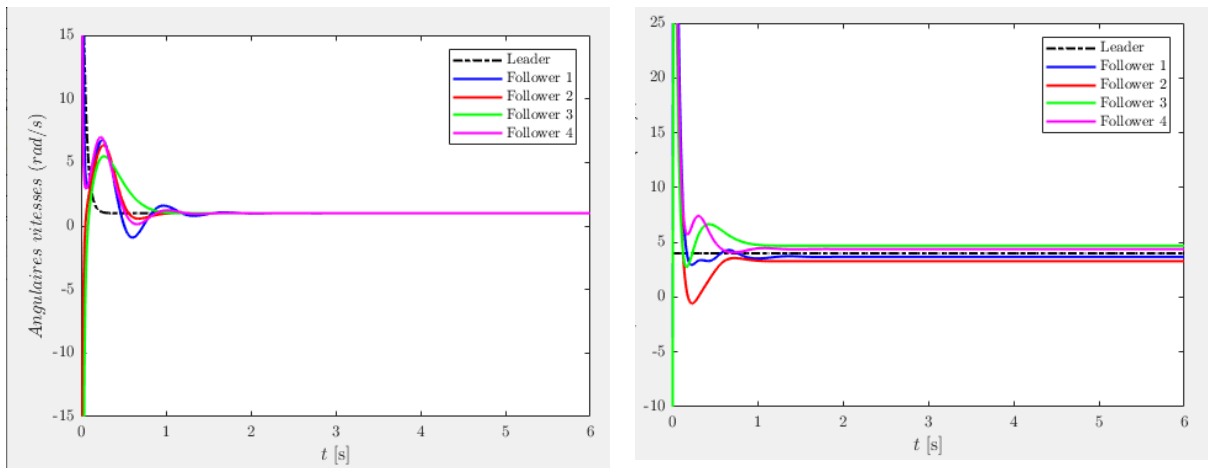
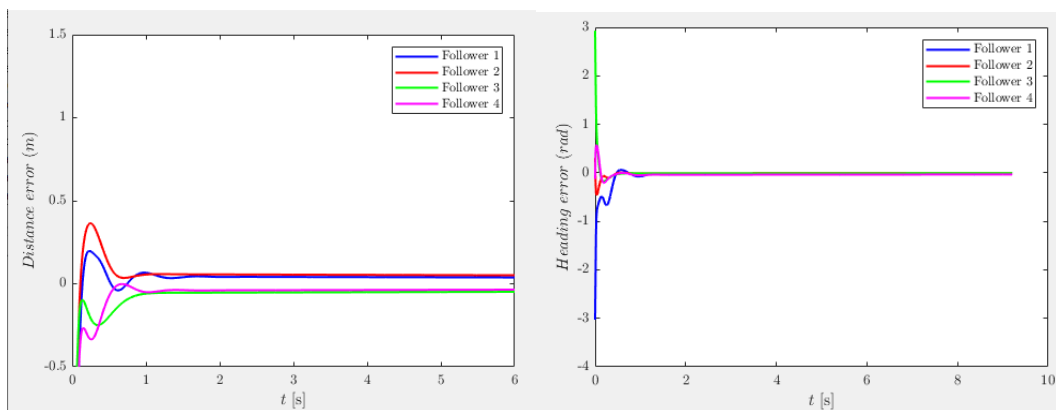


Figure 3.3 : Parcours des leaders et des suiveurs utilisant le PID



(a)



(b)

Figure 3.4 : les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID : (b)

Résultat :

Comme le montre la Figure (3.), les suiveurs suivent leur leader tout en préservant la bonne séparation et la rotation. La Figure (a) et (b) représente les vitesses linéaire et angulaire des suiveurs, respectivement. Après (t=1s), les vitesses des suiveurs atteignent des valeurs constantes. La Figure (c) et (d), qui représente les erreurs de direction et de distance des suiveurs, respectivement, montre comment les erreurs de suivi des suiveurs convergent vers 0.

3.2.4 trajectoire étoile :

$$p_l = [3; 0; 0] ; l_{ls}^d = 0.5m$$

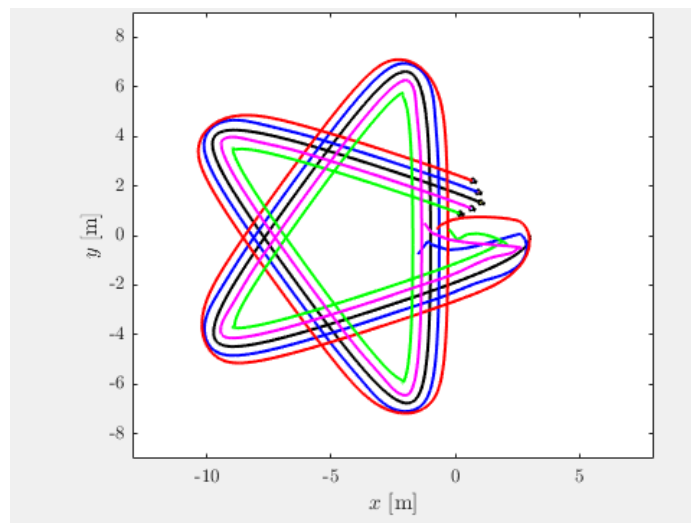
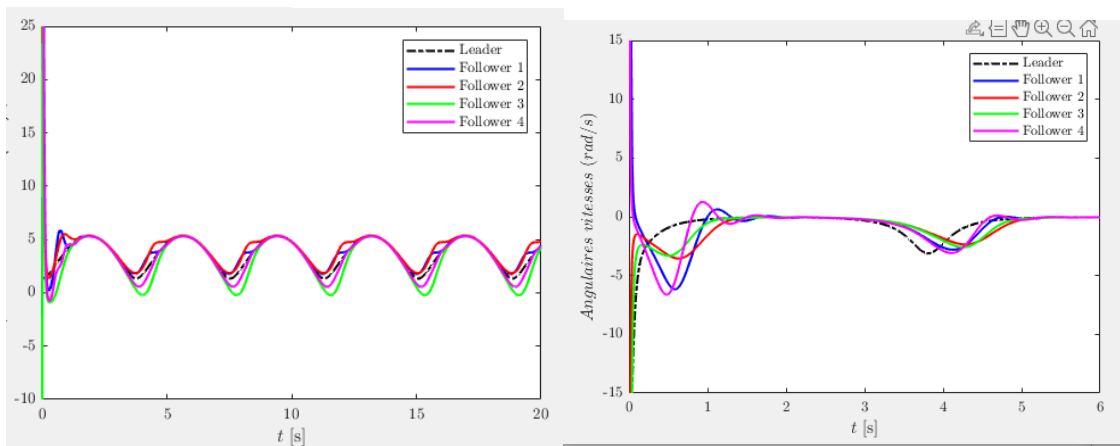
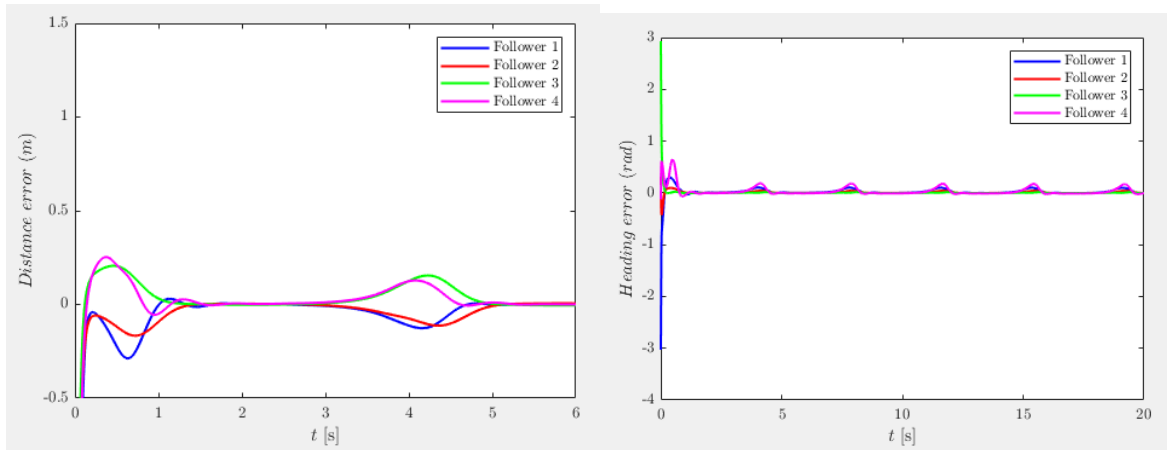


Figure3.4: Parcours des leaders et des suiveurs utilisant le PID



(a)



(b)

Figure 3.4 : les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID :(b)

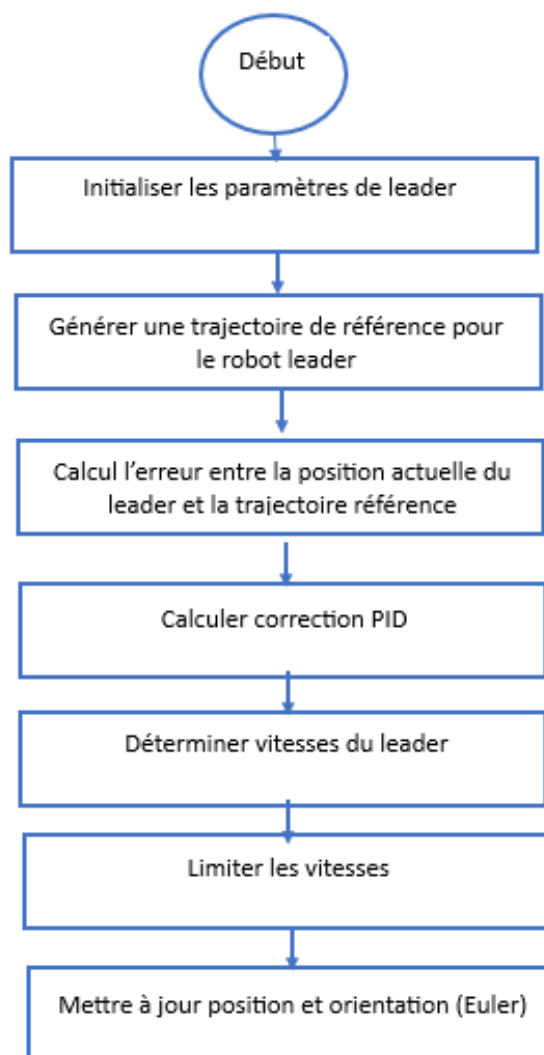
Résultat :

Comme indiqué dans la Figure (3.4), les suiveurs suivent leur leader tout en préservant la bonne séparation et la rotation. La Figure (a) et (b) , montre que les vitesses linéaires et angulaires des suiveurs se rapprochent de celles du leader autour de (t=1s) sans oscillation le long du chemin.

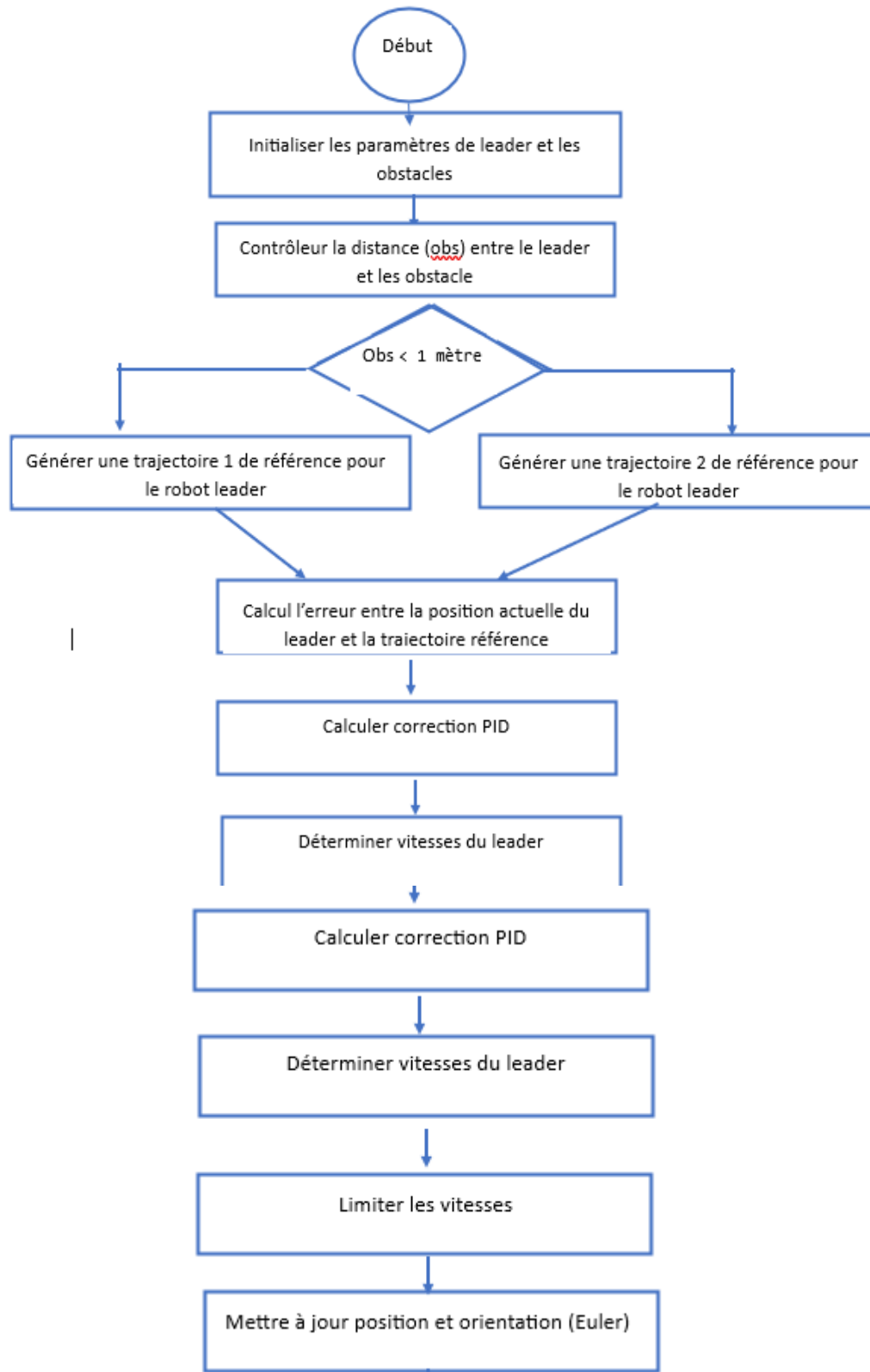
3.2.5 Éviter Obstacle :

a- Organigramme :

- Suiveur :



- Leader :



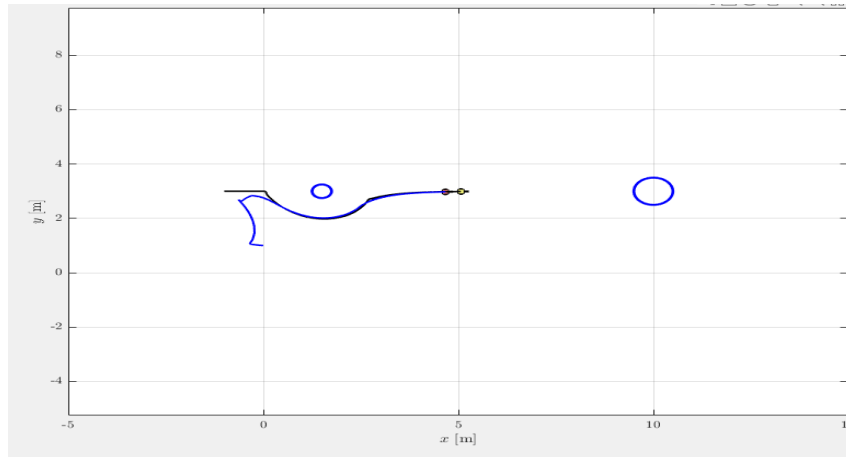
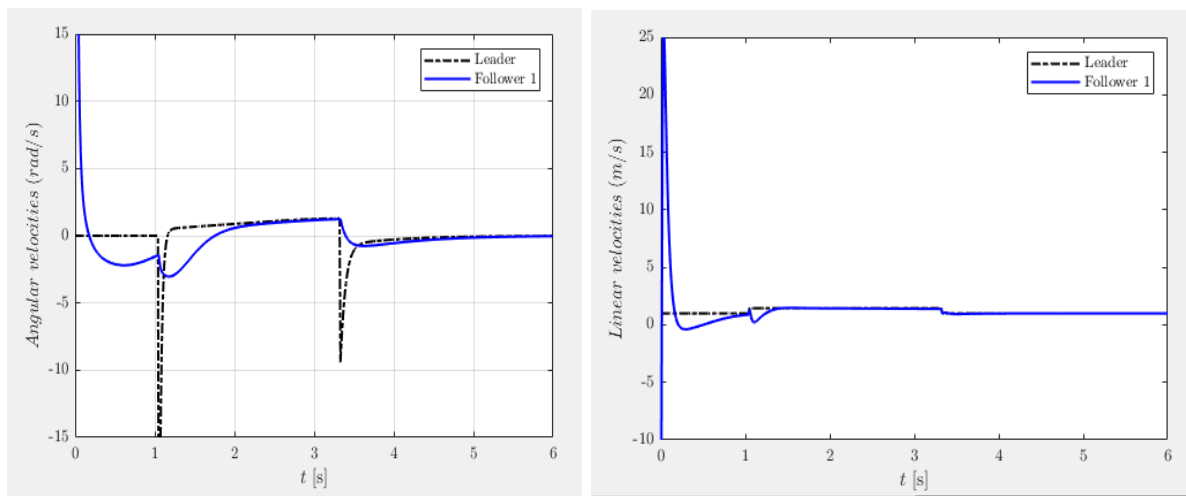
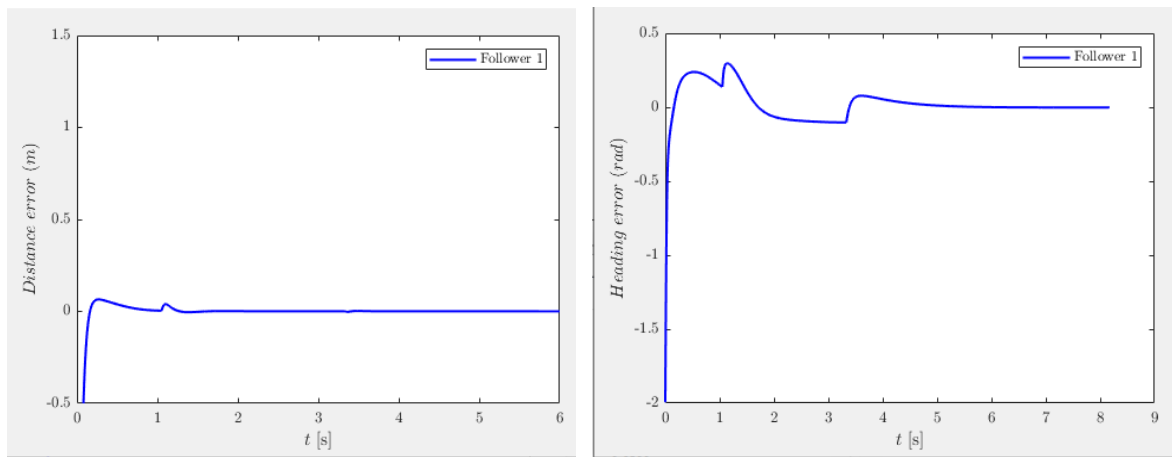


Figure 3.7: Parcours des leaders et des suiveurs utilisant le PID



(a)



(b)

Figure 3.8 : les vitesses des suiveurs : (a) Erreurs de suivi des suiveurs à l'aide du PID : (b)

Résultat :

Comme le montre la Figure (3.), les suiveurs suivent leur leader tout en préservant la bonne séparation et la rotation. La Figure (a) et (b) représente les vitesses linéaire et angulaire des suiveurs, respectivement. Après ($t=1s$), les vitesses des suiveurs atteignent des valeurs constantes. La Figure (c) et (d) , qui représente les erreurs de direction et de distance des suiveurs, respectivement, montre comment les erreurs de suivi des suiveurs convergent vers zéro après ($t = 1s$).

3.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mis en forme par des simulations tout ce qu'on a développé dans les précédents chapitres à savoir la modélisation de notre système qui s'articule sur un robot leader et d'autre suiveur. Et en appliquant la loi de commande P.I.D pour la trajectoire du leader ainsi pour le robot suiveur. Nous avons choisi trois trajectoires, ligne, circulaire et étoile en lui associant un cas avec obstacle. Les résultats en été très satisfaisants.

Conclusion générale :

Ce mémoire propose un modèle de contrôle multi-robot utilisant l'approche leader- suiveur. Le principal objectif de cette thèse est d'étudier et de développer un système de suivi de leader par des robots en appliquant la loi de commande PID.

Dans ce travail, nous avons d'abord défini le concept de robot mobile ainsi qu'un système multi-robot composé d'un leader et de plusieurs suiveurs. Nous avons ensuite modélisé l'ensemble du système pour appliquer des lois de commande basées sur le contrôle coopératif, comme le contrôleur PID. Afin d'expliquer la modélisation et approche de contrôle leader-suiveur.

Nous avons développé un algorithme et obtenu des résultats de simulations sur Matlab.

Ces simulations ont démontré l'efficacité et la stabilité des robots ainsi que d'algorithme de suivi en utilisant approche leader-suiveur, prouvant ainsi leur bon fonctionnement.

Ce programme MATLAB constitue une base solide pour le développement et l'évaluation de stratégies de contrôle et de suivi de trajectoire pour des systèmes multi-robots. Il peut servir de point de départ pour des recherches et des développements futurs dans le domaine de la robotique mobile.

Bibliographie

- [1]: Bayle, B. (2008). Robotique mobile. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg Université Louis Pasteur, 2007.
- [2] : Benhaddouche, D. (2013). Commande Optimale Appliquée à un Robot Mobile (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [3]: Jorge Rocha, I. B.-P. (13 September 2017). Multi-agent Systems. Géographie-cités, UMR 8504, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, France: Department of Spatial Planning and Environment, University of Groningen, The Netherlands.
- [4]: AROUSSI, A. M. (2019). Les Systèmes Multi-Robots coopératifs: comparaison entre les stratégies de coopération (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-). [5]: PANATHULA, C. B. (2012). Solving practical problems in Hilare-type mobile robot trajectory. HUNTSVILLE, ALABAMA.
- [5]: Panathula, C. B. (2012). Solving practical problems in hilare-type mobile robot trajectory tracking control via application of nonlinear model predictive control. The University of Alabama in Huntsville.
- [6]: française, o. q. (1999). robot hilare. quebec.
- [7]: <https://www.oqlf.gouv.qc.ca/>. (2000). contrainte non holonome. quebec: <https://www.oqlf.gouv.qc.ca/>.
- [8]: Sarvepalli, S. S. K. (2015). Multi Robot System: The future of Scientific Learning.
- [9]: MEVO, B. B. (2019). ROBOT MOBILE DE TYPE Unicycle . UQ^{AT} .
- [10]: Zhuang, H., Dong, K., Wang, N., & Dong, L. (2022). Multi-robot leader grouping consistent formation control method research with low convergence time based on nonholonomic constraints. Applied Sciences, 12(5), 2300. [11]: yan, z. (16 may 2023). multi robot systeme. universite de technologie de BELFORT-MONTBELIARD.
- [11]: yan, z. (16 may 2023). *multi robot systeme*. universite de technologie de BELFORT-MONTBELIARD.
- [12]: Rocha, J., Boavida-Portugal, I., & Gomes, E. (2017). Multi-Agent Systems. InTech. doi: 10.5772/intechopen.70241

[13]: Lemize, C., Attoum, I., & Talbi, N. E. (2021). Optimisation du contrôleur PID pour la Commande des systèmes non linéaires par l'algorithme de chauve-souris (Doctoral dissertation, Université de Jijel)..

[14]: Rafael Fierro, P. S. (s.d.). COOPERATIVE CONTROL OF. USA: University of Pennsylvania, Philadelphia PA, USA.

[15] :Habibi SR. The smooth variable structure filter. In : IEEE Conference. Vol. 95. 2007. p. 1026-1059.

[16] : GmbH, S. (2023). *RÉGULATION PID*. Sourcetric GmbH.

[17] : Belobo Mevo, B. (2019). Contribution à la commande adaptative et robuste d'un robot mobile de type unicycle avec modèle non-linéaire (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).