

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Automatique**

Spécialité : **Automatique industrielle**

Présenté par

**SI CHAIB Chakib
SI TAYEB Razika**

Thème

Navigation d'un robot mobile avec évitement d'obstacles.

Mémoire soutenu publiquement le 25/06/2024 devant le jury composé de :

M SALHI Boualem

MCB, UMMTO, Président

M MELLAH Rabah

Professeur, UMMTO, Encadrant

Mme LOUADJ Fatiha

MAA UMMTO, Examineur

Mme ALKAMA sadia

MCA, UMMTO, Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents, ma mère SADOUDI SAMIA, qui est la lumière de notre maison, mon père SI TAYEB LARBI, qui est le guide de réussite dans ma vie. Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de ma vie, et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et j'espère qu'un jour je serai capable de leur rendre un minimum de ce qu'ils m'ont donné

A mon très cher frère SI MOUHAND, et mes adorables sœurs FARIDA et MELISSA
Recevez alors tout l'honneur que j'espérais depuis toujours vous faire à travers ce modeste travail

A mes oncles, tantes, cousins et cousines et leurs familles

A mon binôme CHAKIB et sa famille.

A tous mes amis avec qui j'ai partagé des beaux et inoubliables moments de ma vie

Je n'oublierai pas pour autant, tous ceux qui sont absents sur cette feuille mais toujours présents dans mon cœur et a toutes les personnes qui m'ont aidé de près et de loin.

Enfin, à tout ce beau monde, que j'aime tant et par lequel j'existe, je dédie ce modeste travail

« razika »

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de leurs efforts. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mon chère frère **FARES**, qui m'a toujours soutenu et encouragé.

A mes amis **ISLEM**, **HAMZA** et à mon binôme **RAZIKA** pour son grand effort et a toute sa famille, et surtout à **NASSIMA** pour son soutien tout au long de mon parcours

A tous les profs qui nous ont ouvert les portes de la connaissance.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible. Merci d'être toujours là pour moi.

« chakib »

REMERCIEMENTS

On rend tout d'abord la gloire à Allah sans qui tout ce qu'on bâti aurait été en vain

La réalisation de ce modeste travail fut une occasion merveilleuse de rencontrer et d'échanger avec de nombreuses personnes nous ne saurions pas les citer toutes sans dépasser le nombre de pages raisonnablement admis dans ce genre de travail

Nous reconnaissons que chacune à des degrés divers mais avec une égale bienveillance apporte une contribution positive à sa finalisation nos dettes de reconnaissance sont à ce point de vue énormes à leur égard

Nous remercions vivement notre encadreur monsieur. MELLAH RABAH d'avoir dirigé ce travail et pour ces constantes disponibilités au long de notre travail ainsi que monsieur TRIKI pour ces conseils et ces soutiens tout au long de notre formation,

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury. Devant qui. Nous avons l'honneur d'exposer notre travail et qui ont pris la peine de lire ce mémoire pour juger son contenu

Notre profonde gratitude et sincères remerciements vont à tous les professeurs qui nous ont suivis durant notre parcours universitaire

Nous réservons ici une place particulière pour remercier vivement tous ceux qui d'une manière ou d'une autre nous ont aidés et encouragés à la réalisation de ce modeste travail.

TABLES DES MATIERES

LISTES DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile	1
1.1 Définition de la robotique	1
1.1.1 Histoire et évolution de la robotique	2
1.1.2 Les domaines d'application de la robotique	3
1.2 Définition d'un robot mobile	4
1.2.1 Exemples d'application	4
1.2.2 Avantages et inconvénients des robots mobiles	5
1.2.3 Différences entre robots mobiles et robots fixes	6
1.3 Types de robots mobiles.....	6
1.3.1 Robot mobile à roues.....	6
1.3.1.1 Avantages des Robots à Roues	7
1.3.1.2 Inconvénients des Robots à Roues	7
1.3.2 Robot mobile utilisant la chenille.....	7
1.3.2.1 Exemples d'application des robots mobiles a chenille.....	7
1.3.2.2 Avantages et inconvénients	8
1.3.3 Robot mobile à pattes	8
1.3.3.1 Exemples d'application des robots mobiles a pattes	8
1.3.3.2 Avantages et inconvénients	9
1.4 Robots mobiles à deux roues	9
1.4.1 Types de roues utilisées dans les robots à deux roues.....	9
1.4.1.1 Roues omnidirectionnelles.....	9
1.4.1.2 Roues motrices.....	9
1.4.1.3 Roues pivotantes	10

1.4.1.4 Roues Mecanum	10
1.4.1.5 Roues tout-terrain	10
1.4.2 Principes de base et fonctionnement des robots à deux roues.....	11
1.4.2.1 Équilibre et stabilisation	11
1.4.2.2 Mouvement et direction.....	11
1.4.2.3 Capteurs pour la navigation	12
1.4.3 Applications spécifiques des robots à deux roues	12
1.4.3.1 Robotique éducative	12
1.4.3.2 Robots de service	13
1.4.3.3 Robots de surveillance	13
1.4.3.4 Robots de livraison	13
Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile	15
2.1 Représentations d'un robot	15
2.1.1 Position du robot	15
2.1.2 Matrices de translations	16
2.1.3 Coordonnées polaires	19
2.1.4 Matrices de rotation	20
2.1.4.1 Définition de la matrice de rotation	20
2.1.4.2 rotations.....	20
2.1.5 Matrices de translation et de rotation.....	22
2.2 Modèles cinématique du robot mobile.....	23
2.2.1 Notation et hypothèse.....	23
2.2.2 Calcul de la cinématique	25
2.2.3 Modèles cinématique direct	26
2.2.4 Modèles cinématique inverse.....	27

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile	28
3.1 Introduction	28
3.1.1 Présentation du problème de la planification de trajectoire dans le contexte des robots mobiles.	28
3.1.2 Aperçu des méthodes de planification de trajectoire existantes.....	29
3.1.2.1 Recherche exhaustive.....	29
3.1.2.2 Champs de potentiel.....	29
3.1.2.3 Méthodes probabilistes	29
3.1.2.4 Nearness Diagram Navigation (ND).....	29
3.1.2.5 Velocity Obstacles (VO).....	29
3.1.2.6 Dynamic Window Approach (DWA)	29
3.1.2.7 The Obstacle Restriction Method (ORM).....	29
3.2 Fondements théoriques	30
3.2.1 Concepts de base en robotique mobile.	30
3.2.2 Introduction à la méthode du champ potentiel.	30
3.2.3 Principe de fonctionnement de la méthode du champ potentiel pour la planification de trajectoire.	30
3.2.3.1 Représentation du robot comme une particule	30
3.2.3.2 Création du champ de potentiel.....	31
3.2.3.3 Combinaison des champs attractifs et répulsifs	31
3.2.3.4 Calcul de la trajectoire	31
3.2.3.5 Réévaluation continue	31
3.3 Modélisation du champ potentiel	32
3.3.1 Description	32
3.3.2 Définition des champs attractifs et répulsifs	33

3.3.2.1 Champs attractifs	33
3.3.2.2 Champs répulsifs	33
3.3.3 Méthodes pour représenter la cible et les obstacles dans le champ potentiel.	33
3.3.3.1 Représentation discrète	33
3.3.3.2 Représentation continue.....	33
3.3.3.3 Représentation basée sur des modèles géométriques	34
3.3.3.4 Représentation basée sur des cartes de coûts	34
3.3.3.5 Représentation basée sur des modèles probabilistes	34
3.3.4 Calcul des forces attractives et répulsives.....	34
3.3.5 Stratégies pour éviter les minima locaux	36
3.3.5.1 Compréhension des minima locaux.....	36
3.3.5.2 Impact des minima locaux sur la navigation des robots Mobiles.....	37
3.3.5.3 Approches pour éviter les minima locaux.....	37
3.3.5.4 Importance de la prise en compte des minima locaux dans la conception des algorithmes de navigation.....	38
Chapitre 4 : Simulation Matlab	39
4.1 Contexte et Objectifs	39
4.1.1 Contexte de la simulation.....	39
4.1.2 Objectifs de la simulation	39
4.1.2.1 Contrôle manuel du robot Mode 1	39
4.1.2.2 Navigation automatique vers des points cibles Mode 2	39
4.1.2.3 Navigation avec champ potentiel Mode 3	40

4.2 Mode Manuel	40
4.2.1 Description	40
4.2.1.1 le fonctionnement du mode manuel.....	40
4.2.1.2 l'interface utilisateur et les contrôles utilisés.	41
4.2.2 Résultats et Analyse	42
4.2.2.1 résultats obtenus avec ce mode.....	42
4.2.2.2 Analyser les avantages et les limitations	43
4.3 Mode de Planification de Trajectoire	43
4.3.1 Description	43
4.3.1.1 méthodes de planification de trajectoire utilisée.	43
4.3.1.2 algorithmes ou techniques spécifiques employés	44
4.3.2 Résultats et Analyse	45
4.3.2.1 résultats obtenus avec ce mode.....	45
4.3.2.2 Analyser les avantages et les limitations	46
4.4 Mode d'Évitement d'Obstacles avec la Méthode du Champ Potentiel	47
4.4.1 Description	47
4.4.1.1 méthode de planification de trajectoire utilisée	47
4.4.1.2 Étapes de l'algorithme.....	48
4.4.1.3 Gestion des cas spéciaux et des situations imprévues	51
4.4.2 Résultats et Analyse	54
4.4.2.1 résultats obtenus avec ce mode.....	54
4.4.2.2 Analyser	55
CONCLUSION GENERAL	56
BIBLIOGRAPHIE	

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Différents secteurs et exemples d'utilisation des robots	5
Figure 2 : Exemple des robots mobile à chenille	7
Figure 3 : Exemple des robots mobile à pattes.....	8
Figure 4 : Présentation de robot mobile	16
Figure 5 : Visualisation du Déplacement entre Repères pour un Robot Mobile.....	17
Figure 6 : Trajectoire du Robot Mobile entre Repères.....	18
Figure 7 : Représentation cartésienne et polaire de point D	19
Figure 8 : Représentation de la Rotation pour un Robot Mobile	20
Figure 9 : Déplacement et Rotation d'un Robot Mobile.....	23
Figure 10 : Représentation des Repères de Référence et Hypothèses Cinématiques du Robot Mobile.....	24
Figure 11 : CIR du robot mobile	24
Figure 12 : Représentation des Champs de Potentiel et des Lignes de Courant	32
Figure 13 : Application de la Méthode du Champ Potentiel pour la Navigation dans un Couloir	32
Figure 14 : Boucle de simulation manuelle (Mode 1).....	40
Figure 15 : Fonction qui met à jour la valeur des vitesses des roues en utilisant les Sliders	41
Figure 16 : Interface de simulation du mode manuelle (mode 1)	42
Figure 17 : Boucle de simulation planification de la trajectoire Mode 2	44
Figure 18 : Résultat de simulation de planification de trajectoire mode 2.....	46
Figure 19 : Navigation dans un Couloir avec Évitement d'Obstacle par la Méthode du Champ Potentiel	47
Figure 20 : Initialisation des obstacles et du point cible	48
Figure 21 : Fonction qui calcul les forces attractives, répulsive et totale	48
Figure 22 : Fonction qui convertit les forces calculées en vitesses linéaire et angulaire	49
Figure 23 : Boucle de simulation avec champ potentiel mode 3.....	50
Figure 24 : Fonction de déblocage du robot <i>check_for_loop</i> et <i>check_if_stuck</i>	52
Figure 25 : Simulation avec application de champ potentiel mode 3	54

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de la robotique mobile est captivant et en perpétuelle évolution, intégrant des disciplines telles que la mécanique, l'électronique, l'informatique et l'intelligence artificielle. Les robots mobiles, capables de se déplacer de façon autonome et d'interagir avec leur environnement, jouent un rôle crucial dans divers secteurs, de l'industrie à la médecine.

Le développement de la robotique mobile grâce à l'amélioration des capteurs et l'augmentation de la puissance de calcul embarquable, engendre la création de robots mobiles capables de naviguer dans un environnement parsemé d'obstacles ce qui signifie d'une part la réalisation des tâches avec un certain degré d'autonomie et d'autre part l'exploration des zones dangereuses et inaccessibles à l'être humain. [1]

Généralement, la commande d'un robot s'appuie sur une architecture de navigation en utilisant les fonctions nécessaires, à savoir : la perception, la modélisation, la planification, la localisation, l'action et la décision. [1]

La principale problématique abordée dans ce mémoire est de développer une commande efficace pour un robot mobile permettant la navigation autonome avec évitement d'obstacles. Les défis comprennent la détection et l'évitement des obstacles en temps réel, ainsi que la planification de la trajectoire comme seconde proposition pour garantir une navigation optimale.

Pour résoudre cette problématique, nous avons utilisé la méthode du champ potentiel, qui génère des forces fictives repoussant le robot des obstacles tout en l'attirant vers sa destination. Ce mémoire, intitulé "Commande d'un robot mobile avec évitement d'obstacles", explore en profondeur cette approche. Nous avons étudié la modélisation des robots mobiles, la planification de trajectoire et testé nos algorithmes à travers des simulations sur Matlab.

Le texte est organisé en quatre parties principales. La première partie présente les principes généraux de la robotique mobile. La seconde partie se concentre sur la conception des robots mobiles, avec une modélisation cinématique et dynamique détaillée. La troisième partie aborde la planification de trajectoire, essentielle pour la navigation autonome. Enfin, la quatrième partie se focalise sur les applications et les simulations sur Matlab, illustrant les résultats obtenus et leur pertinence par rapport aux objectifs initiaux de l'étude.

Ce mémoire vise à fournir une vue d'ensemble claire et informative de la robotique mobile, tout en démontrant les compétences théoriques et pratiques acquises au cours de nos études de master.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE MOBILE

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

1.1 Définition de la robotique :

La robotique mobile est une branche de la robotique qui concerne la création et l'exploitation de robots autonomes qui peuvent se déplacer et interagir avec leur environnement. Les principes de la robotique sont combinés avec les technologies de mobilité afin de concevoir des systèmes électromécaniques intelligents. La définition d'un robot mobile est celle d'un système électromécanique équipé de capacités de déplacement, piloté par des logiciels intègre une intelligence artificielle. Ces robots sont autonomes dans différents environnements et sont fréquemment employés dans différents secteurs tels que la logistique, l'exploration spatiale ou encore l'aide aux personnes. [1 ,2]

Il est indispensable d'avoir une expertise pluridisciplinaire pour concevoir un robot mobile, en intégrant des concepts de mécanique, d'électronique, d'automatique, d'informatique et de science artificielle. Il est également nécessaire que ces robots soient équipés de systèmes de perception, de localisation et de planification de trajectoire pour qu'ils puissent naviguer de manière efficace dans leur environnement et réaliser leurs missions. [3,4]

1.1.1 Histoire et évolution de la robotique

La robotique a une longue et riche histoire qui remonte à l'Antiquité, mais elle a vraiment pris son essor au 20ème siècle avec les avancées technologiques. [5,6]

A) Premières Inventions et Automates (Antiquité - 18ème siècle) :

L'origine des premiers automates remonte à la Grèce antique, avec des appareils tels que la machine d'Anticythère. Au 18ème siècle, des inventeurs tels que Jacques de Vaucanson a développé des machines avancées qui peuvent reproduire des gestes humains basiques. [5]

B) Ère Industrielle et Premiers Robots (19ème - 20ème siècle) :

L'amélioration d l'industrie a permet d'automatisons des tâches répétitives grâce à l'utilisation de machines à vapeur et de moteurs électriques. La pièce de théâtre R.U.R. (Rossum's Universal Robots) de Karel Čapek en 1920 a fait connaître le mot "robot".

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

Unimate, le premier robot industriel, a été présenté en 1961, transformant ainsi les chaînes de montage. [6]

C) Révolution Informatique (1970s - Présent) :

Les progrès réalisés dans l'informatique ont entraîné des avancées majeures dans les domaines de l'intelligence artificielle (IA) et de la robotique. Des algorithmes avancés de traitement de données, de perception et de prise de décision ont permis aux robots de devenir plus intelligents et de réaliser des tâches complexes. [6]

1.1.2 Les domaines d'application de la robotique

Aujourd'hui, la robotique est utilisée dans de nombreux domaines, chacun apportant des bénéfices uniques et révolutionnaires. [7]

- **Industrie et Fabrication** : les robots industriels sont fréquemment employés afin de réaliser des tâches répétitives avec une grande précision. Ils favorisent l'augmentation de la productivité tout en diminuant les dangers pour les employés.
- **Médecine et Santé** : Les robots médicaux fournissent une assistance lors des interventions chirurgicales, des diagnostics et de la rééducation. Ainsi, le robot Da Vinci offre la possibilité de réaliser des interventions chirurgicales précises et peu invasives.
- **Exploration et Environnements Hostiles** : impliquent l'utilisation de robots dans des environnements dangereux, comme l'exploration sous-marine ou spatiale, où les humains ne peuvent pas travailler sans danger ou sans possibilité.
- **Service et Assistance** : Les robots de service offrent une assistance aux individus dans leur vie quotidienne, que ce soit à domicile, dans les hôpitaux ou dans les hôtels. Ils ont la capacité de réaliser des tâches ménagères, de fournir des renseignements ou d'apporter leur aide aux personnes âgées et handicapées.
- **Agriculture** : Les robots agricoles automatisent des opérations comme la récolte, la plantation et le traitement des cultures, ce qui améliore l'efficacité et diminue le besoin de main-d'œuvre.
- **Transports et Logistique** : On utilise des robots et des systèmes automatisés pour gérer les entrepôts, livrer des colis et utiliser des véhicules autonomes.

1.2 Définition d'un robot mobile

Il existe de nombreuses définitions du terme robot. Fondamentalement, on peut retenir celle-ci : un robot est une machine dotée de capacités de perception, de décision et d'action, qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement.

On distingue deux types de robots. Les robots fixes, généralement utilisés dans l'industrie, réalisent des tâches dangereuses, répétitives ou nécessitant une grande précision. En revanche, les robots mobiles sont utilisés pour transporter des charges ou accomplir diverses tâches, telles que des missions domestiques, militaires, et bien d'autres.

1.2.1. Exemples d'application

Les robots mobiles trouvent des applications dans de nombreux secteurs : [8]

A) **Logistique et Transport :**

On peut les trouver dans les entrepôts et centres de distribution là où on utilise des robots de tri et de déplacement des marchandises, comme les robots Kiva utilisés par Amazon qui sont largement employés. Ou aussi dans le domaine de la livraison de colis par exemple, des robots de livraison autonomes sont utilisés pour transporter des colis et de la nourriture, tels que ceux développés par Starship Technologies.

B) **Industrie et Fabrication :**

Pour la Transportation de matériaux entre stations de travail dans les usines de production on utilise souvent des robots, ainsi que pour la maintenance et l'inspection

C) **Secteur Militaire et Sécurité :**

Dans le militaire et de la sécurité, des missions avec des robots sont menées pour explorer des zones dangereuses. De même, dans le domaine du déminage et du désamorçage, des robots spécialisés comme les robots PackBot de iRobot sont utilisés pour sécuriser les zones à risque.

D) **Exploration et Recherche :**

Dans l'exploration spatiale, des rovers comme Curiosity et Perseverance sont déployés sur Mars pour recueillir des données précieuses. Parallèlement, dans le domaine de la recherche océanographique, des véhicules autonomes sous-marins (AUV) sont utilisés pour explorer les profondeurs des océans.

E) **Services et Assistance :**

Les robots domestiques, tels que les aspirateurs, simplifient les tâches ménagères au quotidien. De même, dans le domaine de l'assistance aux personnes âgées et handicapées, des robots de soins et des exosquelettes sont développés pour améliorer la qualité de vie et l'autonomie.

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

F) Secteur Médical :

Dans les hôpitaux et cliniques, des systèmes robotiques assurent le transport efficace de médicaments et de fournitures médicales essentielles. Par ailleurs, la chirurgie robotique, grâce à des systèmes comme le Da Vinci, permet des interventions chirurgicales précises et minimement invasives.

Dans **figure 1** on peut trouver différents secteurs et exemple d'utilisation des robots

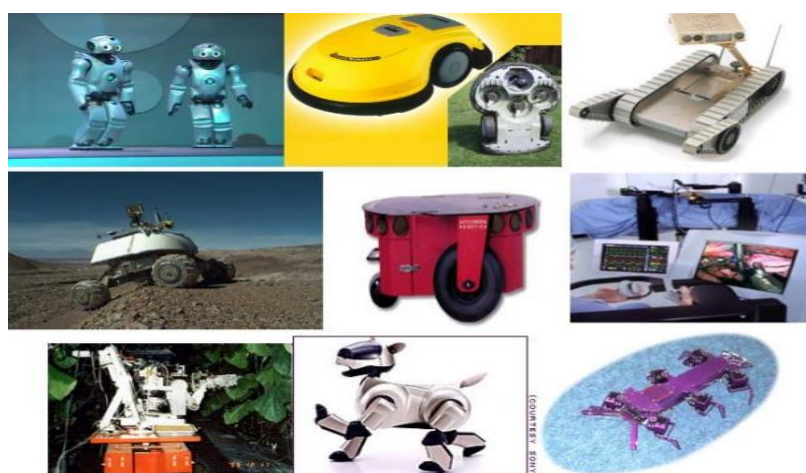


Figure 1 : Différents secteurs et exemples d'utilisation des robots

1.2.2. Avantages et inconvénients des robots mobiles

Les robots mobiles présentent une grande souplesse, pouvant être adaptés à différentes tâches dans différents contextes. Grâce à l'utilisation de capteurs avancés, ils sont capables de naviguer de manière autonome, ce qui permet de réduire la supervision humaine et d'augmenter la productivité. Les opérations industrielles et logistiques sont améliorées grâce à leur efficacité remarquable, ce qui améliore les performances. En se rendant dans des environnements dangereux tels que les zones contaminées, ils réduisent les dangers pour les employés. Toutefois, leur mise en place et leur entretien sont onéreux et techniquement complexes. Ils peuvent également faire face à des obstacles dans des milieux inattendus ou dynamiques tels que les terrains accidentés. En outre, leur utilisation de technologies avancées les met en danger face aux pannes et aux attaques informatiques, ce qui met en péril leur fiabilité et leur sécurité. [9,10]

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

1.2.3. Différences entre robots mobiles et robots fixes

A) Mobilité :

Les robots mobiles ont la capacité de se déplacer dans leur environnement, ce qui leur permet de changer de position et de naviguer en évitant les obstacles. En revanche, les robots fixes sont statiques, habituellement montés sur des bases immobiles, ce qui limite leur zone d'opération à leur champ de travail immédiat.[11]

B) Flexibilité :

Les robots mobiles sont extrêmement flexibles, pouvant être reprogrammés pour diverses tâches et facilement redéployés dans différents environnements. Par contre, les robots fixes sont moins flexibles, souvent conçus pour des tâches spécifiques dans des environnements contrôlés comme les chaînes de montage industrielles. [11]

C) Applications :

Les robots mobiles sont utilisés dans des applications nécessitant un déplacement autonome, comme la logistique, l'exploration et la santé, etc.. En contrepartie, les robots fixes sont prédominants dans les environnements de production industrielle pour des tâches répétitives telles que l'assemblage, la soudure et la peinture. [11]

D) Infrastructure :

Les robots mobiles nécessitent des infrastructures de support minimales et sont capables d'opérer dans des environnements changeants. Tandis que les robots fixes requièrent souvent des infrastructures complexes comme des postes de travail fixes, des convoyeurs et des systèmes de sécurité. [11]

1.3 Types de robots mobiles

Les mécanismes de locomotion des robots mobiles sont caractérisés par leur capacité à se déplacer de diverses façons en fonction de leurs applications particulières. Les robots mobiles sont principalement composés de robots à chenille, de robots à pattes et de robots à roues. [12]

1.3.1 Robot mobile à roues

Les robots mobiles à roues sont actuellement les plus sollicités. La principale explication réside dans la simplicité de la conception du mécanisme. Jusqu'à présent, la majorité des robots mobiles opérationnels évoluent sur des sites spécifiques : environnement intérieur ou sites industriels. En général, ces robots ont trois ou quatre roues. Dans les situations rares, ils peuvent être équipés de six roues, voire davantage.

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

1.3.1.1 Avantages des Robots à Roues

Les robots à roues ont une structure mécanique simple, facilitant leur construction et leur entretien. Ils sont très performants sur des terrains plats, se déplacent rapidement et consomment moins d'énergie que les robots à pattes.

1.3.1.2 Inconvénients des Robots à Roues

Toutefois, ils rencontrent des difficultés sur des terrains irréguliers ou glissants et ont du mal à franchir de grands obstacles ou à monter des escaliers. Leur stabilité sur des surfaces inclinées nécessite souvent des stabilisateurs ou des systèmes de correction de trajectoire.

1.3.2 Robot mobile utilisant la chenille

Quand le terrain est plus désordonné, les véhicules à roues ont du mal à progresser. Les chenilles sont donc davantage efficaces. Elles favorisent une meilleure adhérence au sol. La détermination de la direction de conduite est basée sur la disparité entre les vitesses imposées aux chenilles, comme le montre **la figure 2** qui illustre deux prototypes de robots mobiles à chenille



Figure 2 : exemple des robots mobile à chenille

1.3.2.1 Exemples d'application des robots mobile a chenille :

Les robots mobiles à chenilles sont utilisés dans diverses applications critiques. Ils sont essentiels pour l'exploration de terrains difficiles tels que les zones volcaniques ou les planètes extraterrestres, comme en témoignent les rovers martiens. Dans le domaine du déminage, ces robots sont déployés pour détecter et neutraliser en toute sécurité les mines terrestres. De plus, ils jouent un rôle crucial lors des interventions en catastrophe, permettant de rechercher et de secourir des victimes ou d'évaluer les dégâts dans des environnements potentiellement dangereux.

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

1.3.2.2 Avantages et inconvénients

Les robots mobiles à chenilles présentent plusieurs avantages distincts ils offrent une grande stabilité grâce à leur faible pression au sol, ce qui leur permet de traverser des terrains difficiles avec assurance. Leur traction est excellente sur des surfaces glissantes ou irrégulières, assurant ainsi une mobilité efficace dans des environnements variés. De plus, ils sont conçus pour être robustes, capables de résister à des conditions extrêmes et à l'usure prolongée, ce qui en fait des choix idéaux pour des missions exigeantes comme l'exploration ou le déminage.

Bien qu'ils offrent une traction exceptionnelle sur des surfaces irrégulières et une stabilité sur terrain difficile, ils sont souvent plus lents que les robots à roues. Leur capacité de manœuvre peut également être limitée sur des surfaces planes par rapport aux robots à roues, qui peuvent se déplacer plus rapidement et avec une plus grande agilité dans ces environnements.

1.3.3 Robot mobile à pattes

Les engins à roues ou à chenilles ne sont plus efficaces lorsque le terrain devient encore plus incertain, c'est-à-dire avec de grandes différences d'amplitudes, comme un sol jonché de rochers. Dans cette situation, les appareils mobiles dotés de points d'appui discrets sont la réponse au problème de la mobilité. Il s'agit d'une solution universelle, car la grande majorité des animaux terrestres se meuvent ainsi. Cependant, la mise en place d'un tel système et la mise en place de sa commande sont difficiles, La **figure 3** représente trois prototypes de robots mobiles à pattes.



Figure 3 : exemple des robots mobile à pattes

1.3.3.1 Exemples d'application des robots mobile à pattes :

Les robots mobiles à pattes sont polyvalents dans diverses applications critiques. Ils sont utilisés pour explorer des terrains extrêmement accidentés ou des environnements naturels complexes où la flexibilité et l'adaptabilité des pattes sont essentielles. Ces robots sont également déployés dans les opérations de recherche et de

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

sauvetage en terrains difficiles comme les décombres ou les forêts denses, où leur capacité à naviguer efficacement est cruciale. De plus, ils jouent un rôle important dans la recherche biomimétique, contribuant aux études de locomotion animale et à la conception de systèmes robotiques inspirés de la nature pour diverses applications technologiques avancées.

1.3.3.2 Avantages et inconvénients

On se vante de l'adaptabilité des robots mobiles à pattes, de leur capacité à surmonter différents obstacles et à s'adapter à des terrains irréguliers grâce à leurs nombreux points de contact, garantissant ainsi leur stabilité et leur flexibilité. Toutefois, leur complexité mécanique entraîne une augmentation des frais de conception et d'entretien. De plus, la complexité de leurs mouvements entraîne une consommation d'énergie accrue et leur vitesse est souvent inférieure à celle des robots à roues ou à chenilles.

1.4 Robots mobiles à deux roues

Les robots mobiles à deux roues sont une catégorie particulière de robots qui se déplacent à l'aide de deux roues principales. Ces robots sont fréquemment employés en raison de leur conception simple et de leur mobilité. En général, ils requièrent des dispositifs additionnels pour maintenir l'équilibre, tels que des stabilisateurs ou des gyroscopes.

1.4.1 Types de roues utilisées dans les robots à deux roues

Les robots à deux roues ont la possibilité d'utiliser diverses sortes de roues, chacune ayant des caractéristiques particulières adaptées à des besoins variés en matière de mobilité, de traction et de maniabilité.

1.4.1.1 Roues omnidirectionnelles

Les roues omnidirectionnelles, également appelées roues omni, offrent au robot la possibilité de se déplacer dans toutes les directions sans avoir besoin de tourner. Elles sont munies de rouleaux perpendiculaires à la circonférence de la roue principale, ce qui permet un mouvement latéral et diagonal en plus des déplacements avant et arrière. [13]

A) Avantages et Inconvénients :

Les robots à roues omnidirectionnelles offrent une maniabilité qui permet des mouvements latéraux et diagonaux, ce qui est particulièrement avantageux dans des espaces restreints. Ils sont également idéaux pour des applications nécessitant des déplacements précis et complexes. Cependant, leur complexité mécanique peut rendre leur conception et leur maintenance plus compliquées. En revanche, ils peuvent avoir moins de traction sur des surfaces irrégulières ou glissantes par rapport à des roues conventionnelles, limitant parfois leur efficacité dans certains environnements.

1.4.1.2 Roues motrices

Les roues motrices sont les principales roues reliées directement au moteur du robot. Elles procurent la puissance motrice requise pour faire avancer le robot. Ces roues, dans un robot à deux roues, assurent la propulsion et la direction en réglant leur vitesse relative. [14]

A) Avantages et inconvénients

Les roues motrices sont caractérisées par leur conception simple et efficace, ainsi que par leur excellente réponse en matière de contrôle de vitesse et de direction. Toutefois, elles requièrent des dispositifs additionnels afin de garantir la stabilité, ce qui peut représenter un défi dans certaines situations. En ce qui concerne la maniabilité, malgré leur grande souplesse de mouvement, elles peuvent être moins maniables que les roues omnidirectionnelles dans des situations où des virages serrés ou des déplacements précis sont requis.

1.4.1.3 Roues pivotantes

Il est fréquent d'utiliser des roues pivotantes, également appelées roulettes pivotantes, en complément des roues motrices afin de fournir un point de soutien supplémentaire. Elles ont la capacité de pivoter librement et facilitent le mouvement du robot. [15]

A) Avantages et inconvénients

Les roulettes pivotantes offrent plusieurs avantages : elles fournissent un point d'appui supplémentaire qui améliore la stabilité générale. Leur capacité à pivoter sur place permet des virages plus doux et une meilleure manœuvrabilité dans des espaces restreints. Cependant, un mauvais alignement des roulettes peut introduire des complications dans le mouvement précis. En termes de traction, les roulettes pivotantes offrent généralement moins de traction que les roues motrices sur certains types de terrain, ce qui peut limiter leur efficacité dans des environnements variés.

1.4.1.4 Roues Mecanum

Les roues Mecanum sont une variante sophistiquée des roues omnidirectionnelles, constituées de plusieurs rouleaux inclinés à 45 degrés autour de la circonférence de la roue. Ces roues offrent une flexibilité totale dans toutes les directions, incluant le déplacement latéral sans modification de la direction de la roue principale. [16]

A) Avantages et inconvénients

Les roues Mecanum offrent une grande flexibilité, permettant des mouvements dans toutes les directions sans rotation préalable, ce qui les rend idéales pour des environnements contraints et des applications nécessitant une grande mobilité. Toutefois, leur conception plus complexe entraîne des coûts plus élevés en termes de conception et de maintenance. En outre, elles peuvent être moins efficaces et offrir

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

moins de traction sur des surfaces inégales, ce qui peut limiter leur performance dans certains contextes.

1.4.1.5 Roues tout-terrain

La conception des roues tout-terrain vise à améliorer la traction et la stabilité sur des terrains irréguliers et difficiles. Il arrive fréquemment qu'elles soient plus larges et dotées de motifs de bande de roulement profonds afin d'améliorer leur prise sur des surfaces meubles ou rocheuses. [17]

B) Avantages et inconvénients

Les roues tout-terrain sont optimisées pour plusieurs aspects clés, elles offrent une excellente traction sur des surfaces variées comme le sable, la boue et le gravier, grâce à leur conception robuste et durable qui résiste aux conditions difficiles et à l'usure prolongée. Cependant, elles peuvent être moins maniables sur des surfaces dures et lisses en comparaison avec d'autres types de roues. De plus, en raison de leur poids souvent plus élevé, elles peuvent affecter l'efficacité énergétique du robot, nécessitant parfois plus de puissance pour le déplacement.

1.4.2 Principes de base et fonctionnement des robots à deux roues

Les robots à deux roues mobiles sont un genre de robots qui se distinguent par leur simplicité mécanique et leur utilisation facile. Deux roues principales assurent la propulsion et la direction, ce qui nécessite souvent des mécanismes de stabilisation pour maintenir l'équilibre. Nous abordons dans cette section les principes fondamentaux du fonctionnement de ces robots, tels que l'équilibre et la stabilité, le mouvement et la direction, ainsi que l'utilisation de capteurs pour la navigation.

1.4.2.1 Équilibre et stabilisation

Pour les robots à deux roues, l'équilibre est primordial, car leur structure est intrinsèquement instable. Plusieurs mécanismes peuvent être utilisés pour assurer la stabilité, comme :

- **Stabilisateurs physiques** : Il est possible d'inclure des éléments tels que des roulettes pivotantes ou des béquilles afin d'éviter les rotations latérales.
- **Gyroscopes et accéléromètres** : L'orientation et l'accélération du robot sont mesurées par ces capteurs, ce qui permet aux contrôleurs de stabiliser activement le robot en ajustant les vitesses des roues en temps réel.

Contrôle en boucle fermée : Les régulateurs PID, par exemple, exploitent les informations des capteurs afin de maintenir l'équilibre en ajustant en permanence la vitesse des roues. Grâce à ces méthodes, les robots à deux roues peuvent rester debout et se déplacer de manière efficace, même sur des surfaces inégales ou lors de modifications brusques de direction. [18]

Chapitre 1 : Généralités sur la robotique mobile

1.4.2.2 Mouvement et direction

Le mouvement des robots à deux roues est basé sur la variation des vitesses des deux roues. Voici comment ces principes de base fonctionnent :

- **Déplacement en ligne droite** : Les roues tournent à la même vitesse et dans la même direction, permettant au robot d'avancer ou de reculer en ligne droite.
- **Rotation** : En faisant tourner les roues à des vitesses différentes, ou dans des directions opposées, le robot peut pivoter sur place ou tourner dans un arc.
- **Virages et courbes** : Pour tourner en courbe, une roue tourne plus vite que l'autre. La différence de vitesse détermine le rayon de la courbe.

Ces modes de déplacement permettent une grande variété de mouvements, rendant les robots à deux roues très maniables pour des applications en espaces restreints ou encombrés.

1.4.2.3 Capteurs pour la navigation

La navigation et le contrôle des robots à deux roues sont essentiels grâce aux capteurs. Ils offrent des renseignements cruciaux concernant l'environnement et l'état du robot, ce qui facilite une navigation précise et fiable. Les principales catégories de capteurs employées comprennent :

- **Capteurs de distance** : Comme les lidars, les ultrasons ou les infrarouges, ces capteurs mesurent la distance entre le robot et les objets environnants, facilitant l'évitement d'obstacles.
- **Capteurs de position** : Les encodeurs montés sur les roues fournissent des informations sur la vitesse et la distance parcourue, ce qui est essentiel pour le contrôle du mouvement et l'estimation de la position.
- **Capteurs de vision** : Les caméras et les capteurs de profondeur (comme le Kinect) permettent au robot de percevoir et d'interpréter son environnement visuel, aidant à la navigation et à la reconnaissance des objets.
- **Capteurs d'inertie** : Les gyroscopes et les accéléromètres mesurent l'orientation et les mouvements du robot, aidant à maintenir l'équilibre et à stabiliser le déplacement.

Avec les informations provenant de l'un de ces capteurs, les robots à deux roues peuvent se déplacer de manière autonome, éviter les obstacles et atteindre avec précision des cibles préétablies. Grâce à l'emploi d'algorithmes de traitement de données sophistiqués, les capacités de navigation des robots mobiles à deux roues sont considérablement améliorées.

1.4.3 Applications spécifiques des robots à deux roues

Les robots à deux roues sont employés dans divers domaines en raison de leur facilité d'utilisation, de leur facilité de maniement et de leur efficacité. Les principales applications spécifiques des robots à deux roues sont examinées dans cette section, telles que la robotique éducative, les robots de service, les robots de surveillance et les robots de livraison.

1.4.3.1 Robotique éducative

Les robots à deux roues sont largement utilisés dans l'éducation pour enseigner les principes de la robotique, de la programmation et de l'ingénierie. Dans le domaine de l'initiation à la programmation, ils servent souvent de plateforme pour aider les étudiants à apprendre les bases de la logique et de la syntaxe de la programmation. Des kits éducatifs comme LEGO Mindstorms et VEX Robotics intègrent des robots à deux roues pour faciliter cet apprentissage. De plus, ces robots sont utilisés dans des compétitions robotiques telles que la FIRST Robotics Competition ou la RoboCup Junior, où ils participent à des défis variés comme suivre des lignes, éviter des obstacles et jouer à des jeux interactifs. Enfin, les étudiants universitaires explorent également des projets de recherche avancés en utilisant des robots à deux roues, notamment dans les domaines de la robotique et de l'intelligence artificielle, pour des applications telles que la navigation autonome et l'apprentissage machine.

1.4.3.2 Robots de service

La conception des robots de service à deux roues vise aussi à aider les individus dans différentes tâches quotidiennes, Ils servent à l'orientation et à l'information dans les aéroports, les musées et les centres commerciaux, où ils apportent des renseignements, orientent les visiteurs et répondent aux interrogations fréquentes. En ce qui concerne l'aide aux personnes âgées ou handicapées, certains robots de service sont utilisés pour effectuer des tâches domestiques basiques, telles que l'apport d'objets, le rappel des horaires de prise de médicaments et la compagnie interactive. En outre, on utilise des robots à deux roues pour des opérations de nettoyage, comme l'aspiration et le lavage des sols, ainsi que pour des inspections de routine dans des environnements industriels.

1.4.3.3 Robots de surveillance

Ils peuvent aussi jouer un rôle crucial dans la surveillance et la sécurité. Équipés de caméras et de capteurs, ils effectuent des patrouilles de sécurité, surveillant des zones sensibles, détectant des intrusions et signalant des incidents en temps réel aux opérateurs humains. Dans les usines et les entrepôts, ils sont utilisés pour l'inspection industrielle, identifiant des problèmes potentiels, vérifiant la conformité des équipements et surveillant les conditions de travail. De plus, ces robots sont déployés pour la surveillance environnementale, contrôlant des paramètres tels que la qualité de l'air et de l'eau, et fournissant des données cruciales pour la gestion des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

1.4.3.4 Robots de livraison

Les robots à deux roues révolutionnent également le domaine de la livraison. Dans les zones urbaines, des robots autonomes peuvent livrer des colis directement aux clients, réduisant le besoin de véhicules de livraison traditionnels et contribuant ainsi à diminuer les embouteillages et les émissions de carbone. Dans le service de restauration, ces robots livrent des repas et des boissons dans des environnements contrôlés, comme des bureaux et des campus universitaires, garantissant une livraison rapide et efficace. Dans les hôpitaux, les robots à deux roues transportent des médicaments et d'autres fournitures médicales entre différents services, assurant une distribution rapide et sécurisée.

CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UN ROBOT MOBILE

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

2.1 Représentations d'un robot

2.1.1 Position du robot

Une représentation adéquate et efficace d'un robot mobile est sa position et son orientation dans l'espace. La position peut également inclure les vitesses linéaire et angulaire. Bien que notre plan soit en 2D, la position peut également être généralisée en 3D. Pour formaliser la position d'un robot, nous devons introduire des systèmes de référence. Nous utilisons un référentiel fixe dont l'origine est notée \mathbf{W} , ainsi qu'un référentiel lié au robot ou au châssis corporel qui se déplace avec le robot et à son origine est notée \mathbf{A} , de coordonnées x et y par rapport au référentiel euclidien [19,20]

Par conséquent, il est important d'exprimer les coordonnées de n'importe quel point par rapport à ces deux références, qui, dans le cas général, sont pivotés et déplacés l'un par rapport à l'autre. [20]

La figure 4, donne la représentation graphique d'un robot mobile en considérant les paramètres suivants :

q_r = position et orientation du repère (ou châssis) du robot mobile par rapport à un repère de référence fixe [20]

$$\text{Position (2D)} \rightarrow q_r = [x_r, y_r, \theta]^T$$

$$\text{Position} \rightarrow (x_r, y_r)$$

$$\text{Orientation} \rightarrow \theta$$

=====
Chaque point dans l'environnement de travail d'un robot mobile, on peut lui associer deux types de coordonnées à savoir :

(x_W, y_W) , qui représente sa position par rapport au repère fixe. Par rapport à sa position par rapport au repère du robot mobile est donnée par les coordonnées (x_r, y_r) . Avec A est l'origine, θ est l'orientation par rapport à x_W .

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

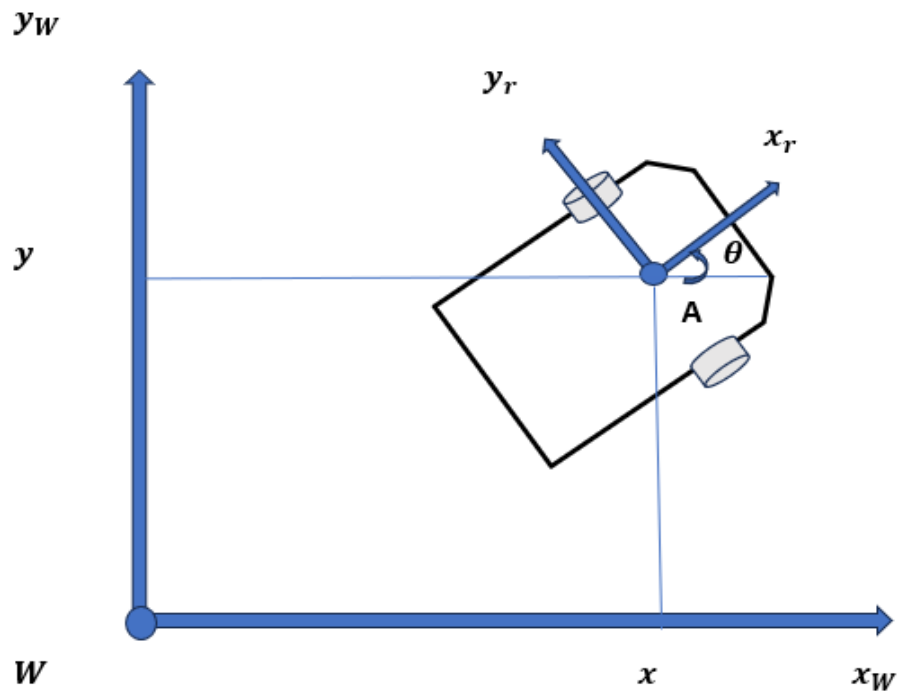


Figure 4 : présentation de robot mobile

2.1.2 Matrices de translations

Une matrice de translation est une matrice utilisée en géométrie et en informatique graphique pour effectuer une translation, c'est-à-dire un déplacement, d'objets ou de points dans un espace tridimensionnel. Elle permet de déplacer un objet d'une certaine distance le long des axes x , y et z . [20]

La matrice de translation 4x4 standard pour un déplacement par (d_x, d_y, d_z) serait de la forme :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cette matrice peut être utilisée pour transformer les coordonnées d'un point (x, y, z) en $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ après la translation en utilisant la multiplication matricielle : [20]

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{1} \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

En ajoutant la translation à une transformation, on peut faire déplacer des objets dans un espace 3D. Cette matrice de translation est un composant essentiel des transformations géométriques utilisées dans la modélisation et le rendu graphique.

En préservant ainsi les concepts mathématiques sur la manière de se déplacer entre les repères importants, la translation devient plus simple.

Considérons des repères de référence de telle manière à traduire la façon dont ils sont purement exprimés l'un par rapport à l'autre par les axes x et y . soit un point, de coordonnées x, y dans le repère du robot comme indiqué **la figure 5**

Ses coordonnées dans le repère du monde seront données par la somme le long de chaque axe des coordonnées dans le repère du robot et celles de l'origine du repère du robot. Pour simplifier, utilisons maintenant une astuce mathématique : si nous ajoutons une dimension factice et choisissons soigneusement les éléments de la matrice de traduction, le résultat final est le même que la somme des coordonnées le long de chaque axe. Nous écrivons simplement la même opération sous une forme différente, et l'avantage deviendra plus clair plus tard. [20]

- Les coordonnées de l'origine 'A' du repaire du robot dans le repaire global
- Point D dans le repaire du robot

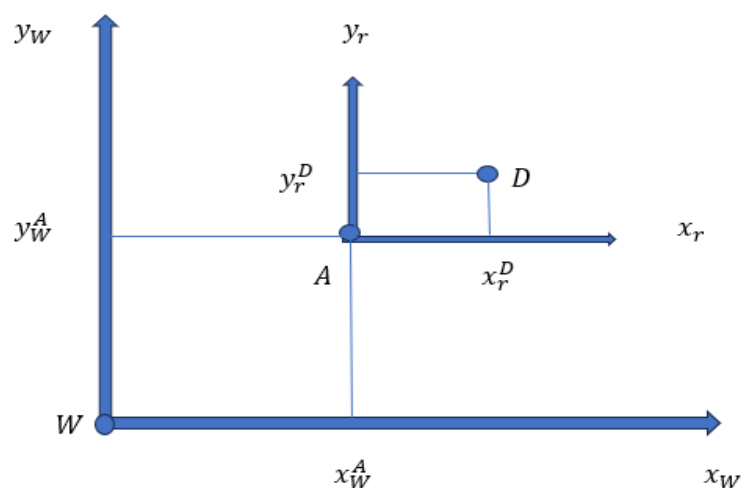


Figure 5 : Visualisation du Déplacement entre Repères pour un Robot Mobile

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

Les coordonnées de **A** dans le repaire global, et ceux de **D** dans le repaire du robot. [20]

$$A_W = \begin{bmatrix} x_W^A \\ y_W^A \end{bmatrix} \quad D_r = \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \end{bmatrix} \quad (3)$$

Le point D dans le repaire fixe [20]

$$\begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_W^A \\ y_W^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^D + x_W^A \\ y_r^D + y_W^A \end{bmatrix} \quad (4)$$

On peut exprimer la translation avec la multiplication de matrice : [20]

$$D_W = \begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & x_W^A \\ 0 & 1 & y_W^A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_T \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^D + x_W^A \\ y_r^D + y_W^A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

La figure 6 donne la trajectoire du robot mobile entre repères.

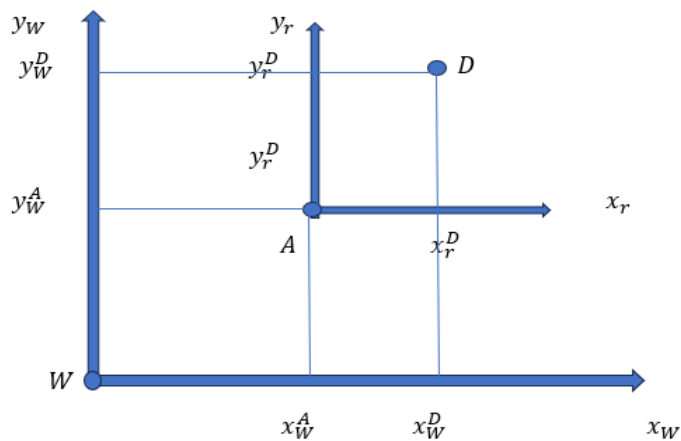


Figure 6 : Trajectoire du Robot Mobile entre repères

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

2.1.3 Coordonnées polaires

Avant d'examiner le cas de la rotation pure, il est utile de rappeler rapidement les coordonnées polaires. Étant donné un point dans \mathbf{R}^2 , au lieu d'utiliser les coordonnées x et y , cela peut être exprimé par un rapport à l'origine et un angle α par rapport à l'axe des x comme le montre la **figure 7**. Rappelons la trigonométrie : nous pouvons alors exprimer les coordonnées cartésiennes x et y par rapport à r et α des coordonnées polaires, ce qui facilite la description des rotations. [20]

Représentation cartésienne de \mathbf{D} :

$$D_W = \begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \end{bmatrix} \quad (6)$$

Représentation polaire de \mathbf{D} :

$$D_W = \vec{r} = (r, \alpha)$$

$$x_W^D = r \cos \alpha$$

$$y_W^D = r \sin \alpha$$

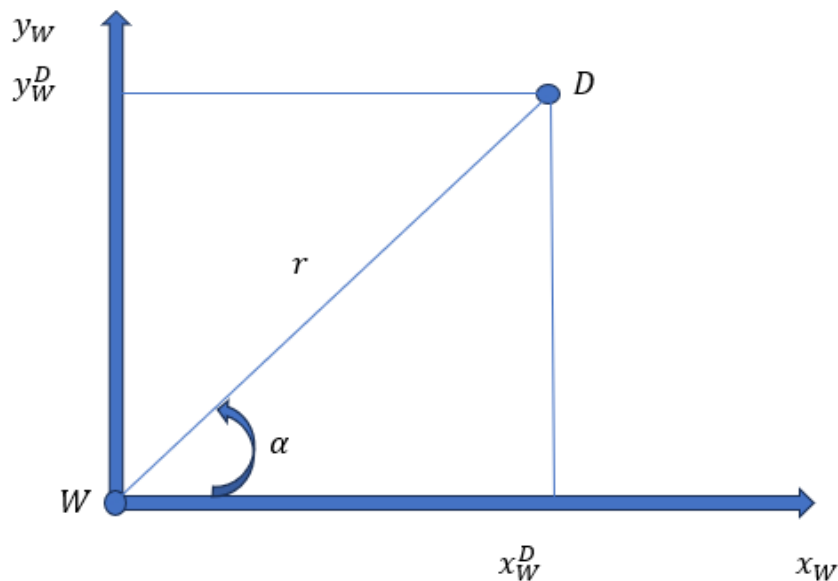


Figure 7 : Représentation cartésienne et polaire de point D

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

2.1.4 Matrices de rotation

2.1.4.1 Définition de la matrice de rotation

La matrice de rotation est une matrice utilisée en géométrie et en algèbre linéaire pour représenter une transformation rotationnelle dans un espace tridimensionnel. Elle permet de décrire le changement d'orientation d'un objet ou d'un système de coordonnées par rapport à un autre.

En général, une matrice de rotation est une matrice carrée R de dimension $n \times n$ (où n dépend de la dimension de l'espace). Pour l'espace tridimensionnel, la matrice de rotation est généralement de dimension 3×3 . La matrice est orthogonale, ce qui signifie que sa transposée est égale à son inverse, préservant ainsi la norme des vecteurs après la rotation. [20]

2.1.4.2 rotations

Considérons maintenant que le monde et celui du robot partagent la même origine, mais le repaire du robot est tourné d'un angle θ par rapport au repère mondial.

Dans ce cas, du point de vue du repère du robot, le point d est toujours à la même distance r de l'origine, mais à un angle $\alpha - \theta$. [20]

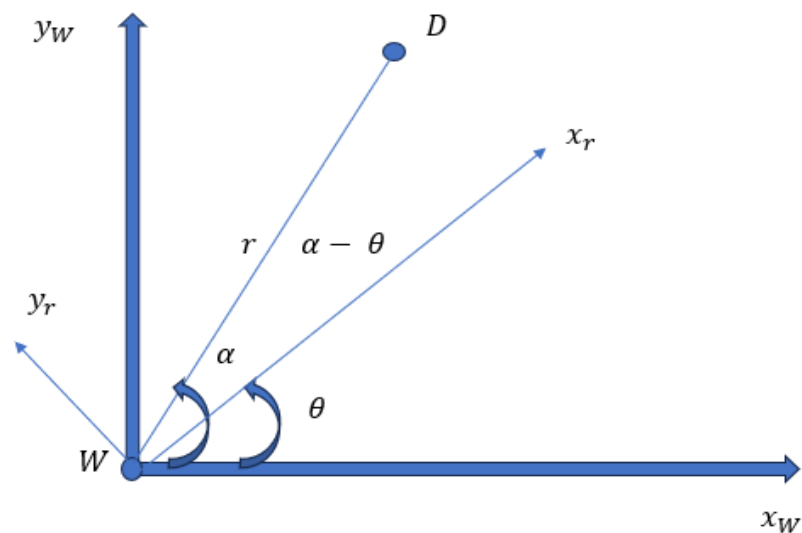


Figure 8 : Représentation de la Rotation pour un Robot Mobile

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

Ainsi, les coordonnées de \mathbf{d} dans le repère tourné seront la projection sur l'axe. Rappelons encore la trigonométrie et les expressions des coordonnées dans le repère non tourné. On obtient une expression compacte reliant les coordonnées de \mathbf{d} dans les deux repères.

Notons qu'il s'agit d'une opération de multiplication matricielle. Cette matrice s'appelle la matrice de rotation. [20]

- Dw.r.t repaire tourné (de θ)

$$x_r^D = r \cos(\alpha - \theta) = x_W^D \cos \theta + y_W^D \sin \theta$$

$$y_r^D = r \sin(\alpha - \theta) = x_W^D \sin \theta + y_W^D \cos \theta$$

- Dw.r.t repère mondial (de θ)

$$x_W^D = r \cos \alpha$$

$$y_W^D = r \sin \alpha$$

- Rotation comme matrice de multiplication

$$\begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}}_{R_\theta^T} \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \end{bmatrix} \quad (7)$$

On le rappelle elle a une propriété spéciale, elle est orthogonale, cela signifie que tout angle, on peut déterminer son inverse, qui est égal à sa transposée, même le nom technique le dit, il appartient au groupe orthogonal spécial en 2D. [20]

Rotations:

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \in SO \quad (8)$$

Le groupe orthogonal dans R^2

$$R_\theta^T = R_\theta^{-1}$$

$$\det(R_\theta) = 1, \forall \theta \in R$$

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

Grace a l'orthogonalité de la matrice de rotation, il est simple d'inverser le mappage et d'exprimer les rotations dans les deux sens de fixe à pivoté et vice versa. [20]

$$\begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}}_{R_\theta^T} \begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}}_{R_\theta} \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.1.5 Matrices de translation et de rotation :

Pour mettre la matrice de rotations et de translation ensemble, la première étape consiste à utiliser la même astuce mathématique de translation et à ajouter une dimension a l'expression de rotation [20]

$$D^a = \begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \\ 1 \end{bmatrix} = R_\theta D_r \quad (11)$$

La deuxième étape consiste à rappeler les relations de traductions qui nécessitent de donner une entrée les coordonnées du point D exprimées dans le repéré de référence qui est exactement ce qui donnée par la relation de rotation pur [20]

$$D_W = \begin{bmatrix} x_W^D \\ y_W^D \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_W^A \\ 0 & 1 & y_W^A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r^D \\ y_r^D \\ 1 \end{bmatrix} = T D^a \quad (12)$$

En remplaçant l'expression de rotation pur dans les translations nous obtenons une cartographie entre n'importe quel point de plan dans le référentiel du monde [20]

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

$$D_W = TD^a = TR_\theta D_r = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x_W^A \\ \sin \theta & \cos \theta & y_W^A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} D^r \quad (13)$$

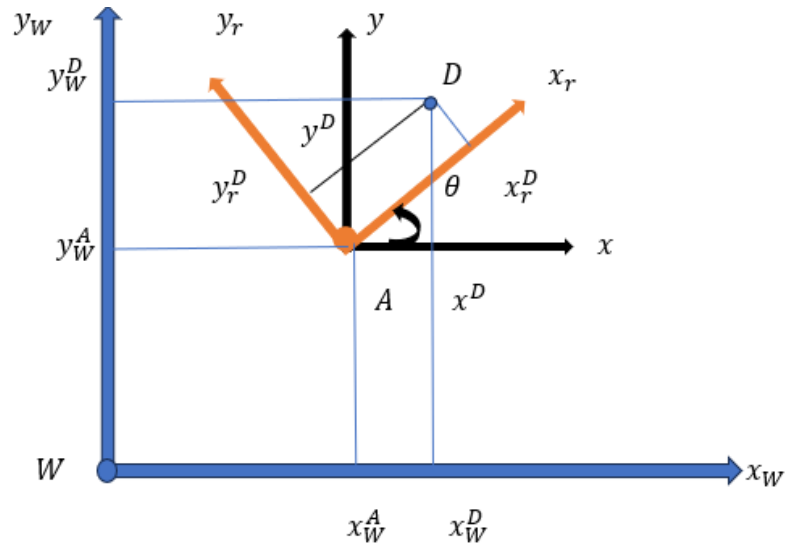


Figure 9 : Déplacement et Rotation d'un Robot Mobile

2.2 Modèles cinématique du robot mobile

2.2.1 Notation et hypothèse [21,22]

Repère fixe : $\{x_W, y_W\}$

Repère du corps (robot) : $\{x_r, y_r\}$

Hypothèse 1 : le robot est symétrique le long de l'axe longitudinal (x')

- Roues équidistantes (longueur de l'essieu = 2L)
- Roues identiques ($R_1 = R_r = R$)
- Centre de masse sur x_r à une distance c de A

Hypothèse 2 : le robot est un corps rigide

La distance entre deux points quelconques du robot ne change pas au fil du temps

Position : $q_r = [x_r, y_r, z_r]^T$

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

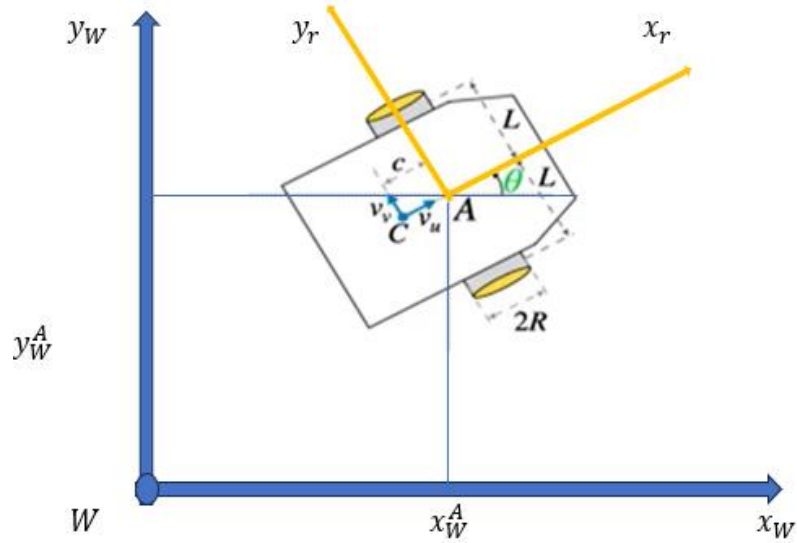


Figure 10 : Représentation des Repères de Référence et Hypothèses Cinématiques du Robot Mobile

Hypothèse 3 : roulement sans glissement

- le robot ne peut pas se déplacer latéralement
- les roues du robot se déplacent sans glissement (après une rotation entière 2π , chaque roue se déplace selon la taille de son périmètre)

On prend ICC comme centre de rotation du robot : [21]

$$v_l = w(d - L) \quad (14)$$

$$v_c = w d \quad \Rightarrow \quad d = L \frac{v_r + v_l}{v_r - v_l} \quad (15)$$

$$v_r = w(d + L) \quad (16)$$

$$w_c = w = \frac{v_R - v_L}{2L} \quad (17)$$

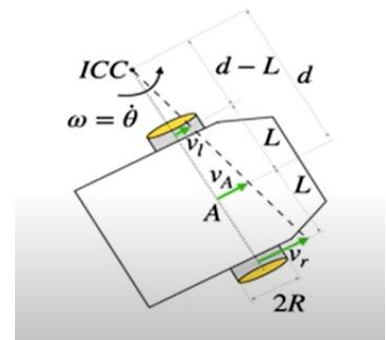


Figure 11 : ICC du robot mobile

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

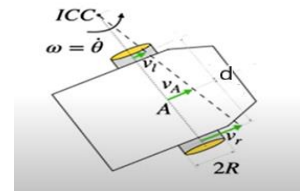
1. Si $v_r = v_l \Rightarrow$ pas de rotation \Rightarrow ICC n'est pas défini
2. Si $v_r = -v_l \Rightarrow$ tourne "sur lui-même" \Rightarrow ICC $\equiv A$
3. Si $v_r = 0$ ou $(v_l = 0) \Rightarrow$ "tourne sur les roues" $\Rightarrow d = -L(d = L)$

2.2.2 Calcul de la cinématique

Un modèle cinématique typique qui calcule les vitesses linéaires v_C , et angulaire w_C du châssis de robot à partir des vitesses des roues droite (v_R) et gauche (v_L), en considérant que les deux roues sont séparées d'une distance d , par conséquent le modèle cinématique est donnée comme suit : [22]

$$v_C = \frac{1}{2}(v_R + v_L) \quad (18)$$

$$w_C = \dot{\theta} = \frac{1}{d}(v_R - v_L) \quad (19)$$



L'utilisation d'un repère de référence locale est implicite dans la dérivation du modèle cinématique ci-dessus. En d'autres termes, la vitesse du châssis, v_C , est exprimée dans la direction avant/arrière du châssis du robot et non dans le repère global qui serait utilisé dans une carte de l'environnement. Étant donné que la direction du châssis du robot change lorsque le taux angulaire est non nul, $w_C = \dot{\theta}$, nous devons appliquer une transformation au modèle cinématique de la conduite différentielle pour calculer le mouvement du châssis du robot par rapport au repère de référence globale. Pour un robot avec un cap, θ , la transformation requise est la matrice de rotation suivante : [22]

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

Cette transformation convertit le mouvement exprimé par rapport au repère local du châssis du robot en un mouvement correspondant dans le repère global. La transformation inverse correspondante est donnée comme suit :

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2.3 Modèles cinématique direct

Nous définissons un vecteur d'état, S , comme la position, x et y , et l'orientation, θ , du châssis du robot. Sa définition et son taux de variation sont donnés comme suit : [21,22]

$$S = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad \dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

Les axes x et y se situent dans le plan « sol » que le robot traverse principalement. L'orientation θ , est mesurée autour de l'axe vertical z , défini comme positif pointant vers le haut. L'orientation est nulle ($\theta = 0$) lorsque la direction avant du châssis du robot est alignée avec l'axe x global. Le taux de variation des états peut être exprimé en termes de vitesse du châssis du robot, v_C , et de taux angulaire, w_C , comme suit :

$$S = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_C \\ 0 \\ w_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_C \cos \theta \\ v_C \sin \theta \\ w_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_R + v_L) \cos \theta \\ \frac{1}{2}(v_R + v_L) \sin \theta \\ \frac{1}{2}(v_R - v_L) \end{bmatrix} \quad (22)$$

- Cette équation modélise comment les vitesses des roues (v_R et v_L) se traduisent en vitesses linéaires (\dot{x} , \dot{y}) et angulaire ($\dot{\theta}$) du robot.
- Utilité : Essentielle pour la compréhension de la dynamique du robot et pour la commande des mouvements.

Chapitre 2 : Modélisation d'un robot mobile

De manière similaire, la position du Centre Instantané de Courbure (CIC) dans l'espace, exprimée par rapport au référentiel mondial, peut être obtenue comme suit [22]

$$\begin{bmatrix} x_{ICC} \\ y_{ICC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} 0 \\ r_{ICC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - r_{ICC} \sin \theta \\ x - r_{ICC} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \frac{d}{2} \frac{(v_R + v_L)}{(v_R - v_L)} \sin \theta \\ y + \frac{d}{2} \frac{(v_R + v_L)}{(v_R - v_L)} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Cette équation permet de calculer la position du CIC pendant un mouvement de rotation du robot. Le CIC est le point instantané autour duquel le robot tourne.

Elle peut être utile pour la planification de trajectoire, notamment lors de la conception de mouvements de rotation précis.

2.2.4 Modèles cinématique inverse [22]

Comme mentionné dans la section Calcul de la cinématique, si nous souhaitons que le robot suive un certain chemin ou une certaine vitesse, nous devons envoyer des commandes de roues appropriées aux roues du robot. Le modèle de cinématique inverse calcule la vitesse de roue requise pour obtenir une vitesse de châssis de robot V_C et une vitesse angulaire W_C souhaitées. Il est obtenu en résolvant simultanément l'Équation 18 et l'Équation 19 pour la vitesse des roues V_R et V_L , et est formulé comme suit

$$\begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_C + \frac{1}{2} d w_C \\ v_C - \frac{1}{2} d w_C \end{bmatrix} \quad (24)$$

CHAPITRE 3 : PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE D'UN ROBOT MOBILE

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.1 Introduction

La planification de trajectoire pour un robot mobile consiste à déterminer l'itinéraire à suivre par ce dernier de telle manière à atteindre sa position d'arrivée. Il existe plusieurs techniques de planification en rapport avec la modélisation de l'environnement dans lequel le robot mobile évolue. Pour ce faire, on considère généralement le robot comme étant un point dans l'espace des configurations libres du robot, puis on cherche la trajectoire adéquate au robot mobile qui lui permet d'atteindre la configuration finale.

3.1.1 Présentation du problème de la planification de trajectoire dans le contexte des robots mobiles.

Dans le contexte des robots mobiles, la planification de trajectoire revêt une importance cruciale pour assurer leur navigation autonome et efficace dans des environnements complexes et dynamiques. L'objectif principal est de déterminer un chemin sécurisé et optimal permettant au robot de se déplacer de sa position actuelle vers une destination souhaitée, tout en évitant les obstacles sur son chemin.

Les environnements où évoluent les robots mobiles peuvent être variés, allant des entrepôts industriels aux zones urbaines encombrées en passant par les terrains extérieurs accidentés. Dans chaque cas, le robot doit être capable de prendre des décisions rapides et intelligentes pour naviguer efficacement tout en minimisant les risques de collision et en atteignant ses objectifs de manière fiable.

Les obstacles rencontrés par les robots mobiles peuvent être de nature diverse, tels que des murs, des bâtiments, des personnes ou d'autres robots. De plus, ces obstacles peuvent être statiques ou mobiles, ce qui ajoute une dimension supplémentaire de complexité à la planification de trajectoire.

Un autre aspect important de la planification de trajectoire est la prise en compte des contraintes cinématiques et dynamiques du robot, telles que sa vitesse, son accélération et son rayon de braquage. Ces limitations doivent être intégrées lors de la génération de trajectoires sûres et réalisables. [23]

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.1.2 Aperçu des méthodes de planification de trajectoire existantes.

Les méthodes de planification de trajectoire existantes couvrent un large éventail d'approches et de techniques, chacune avec ses propres avantages, limitations et domaines d'application :

3.1.2 .1 Recherche exhaustive :

Cette technique consiste à modéliser l'environnement comme un champ de forces attractives et répulsives, offrant une approche intuitive pour la planification de trajectoire. [24]

3.1.2 .2 Champs de potentiel :

Dans ce cas on modélise l'environnement comme un champ de forces attractives et répulsives, offrant une approche intuitive pour la planification de trajectoire. [25]

3.1.2 .3 Méthodes probabilistes :

Elles utilisent des techniques probabilistes pour générer des trajectoires sûres et efficaces, adaptées aux environnements complexes et dynamiques. [26]

3.1.2 .4 Nearness Diagram Navigation (ND) :

Elle est basée sur la construction d'un diagramme de proximité autour du robot pour sélectionner une trajectoire optimale. [27]

3.1.2 .5 Velocity Obstacles (VO) :

Elle prend en compte la position et la vitesse des obstacles mobiles pour déterminer les régions de l'espace sécurisées. [28]

3.1.2 .6 Dynamic Window Approach (DWA) :

Elle évalue les trajectoires possibles en utilisant une fenêtre dynamique représentant les limites de la vitesse et de l'accélération du robot. [29]

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.1.2 .7 The Obstacle Restriction Method (ORM) :

Elle divise l'environnement en cellules discrètes et assigne des coûts à ces cellules en fonction de la présence d'obstacles. [30]

3.2 Fondements théoriques :

3.2.1 Concepts de base en robotique mobile.

La robotique mobile combine des concepts de mécanique, d'électronique, d'informatique et de contrôle pour concevoir, construire et opérer des robots capables de se déplacer dans leur environnement. Parmi les concepts clés, on trouve la cinématique et la dynamique, les capteurs et la perception, la localisation et la cartographie, ainsi que la planification de trajectoire.

3.2.2 Introduction à la méthode du champ potentiel.

La méthode du champ potentiel représente le robot comme une particule évoluant dans un champ de potentiel fictif. Ce champ de potentiel est créé en combinant un champ attractif, qui attire le robot vers sa destination, et un champ répulsif, qui le repousse des obstacles. Le chemin est ensuite calculé en utilisant un algorithme de descente de gradient sur ce champ de potentiel.

Cette méthode est souvent utilisée car elle est rapide et permet de planifier des mouvements en temps réel. Toutefois, elle a un défaut principal : elle peut se retrouver piégée dans des minima locaux, causés par la disposition des obstacles et les coefficients de pénalité appliqués. Pour résoudre ce problème, il existe des techniques comme la définition d'une fonction de potentiel sans minima locaux ou l'emploi d'algorithmes de recherche qui contournent ces minima. [31]

3.2.3 Principe de fonctionnement de la méthode du champ potentiel pour la planification de trajectoire.

Le principe de cette méthode repose sur la création d'un champ de potentiel fictif autour du robot. Les étapes clés sont : [32,33]

3.2.3.1 Représentation du robot comme une particule :

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

Le robot est considéré comme une particule se déplaçant dans un espace potentiel.

3.2.3.2 Création du champ de potentiel :

Le champ de potentiel combine un champ attractif, centré sur l'objectif et attirant la particule robotique, et un champ répulsif, associé aux obstacles et repoussant la particule.

3.2.3.3 Combinaison des champs attractifs et répulsifs :

Les champs attractifs et répulsifs sont combinés pour former le champ de potentiel global. Les zones de faible potentiel attirent le robot vers l'objectif, tandis que les zones de fort potentiel le repoussent des obstacles.

3.2.3.4 Calcul de la trajectoire :

À chaque étape, le robot évalue le gradient du champ de potentiel à sa position actuelle et choisit une direction de déplacement suivant ce gradient, permettant d'atteindre l'objectif tout en évitant les obstacles.

3.2.3.5 Réévaluation continue :

Le robot réévalue constamment son environnement et ajuste sa trajectoire en fonction des changements dans le champ de potentiel, réagissant ainsi aux nouveaux obstacles ou autres modifications de son environnement.

En résumé, la méthode du champ potentiel permet au robot de naviguer de manière autonome en combinant un champ attractif pour atteindre l'objectif et un champ répulsif pour éviter les obstacles.

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.3 Modélisation du champ potentiel

3.3.1 Description

- Chaque objet de l'environnement est associé à un champ de forces
- Les forces peuvent varier avec la distance, peuvent agir sur une étendue limitée
- Le robot suit le champ de forces [34]

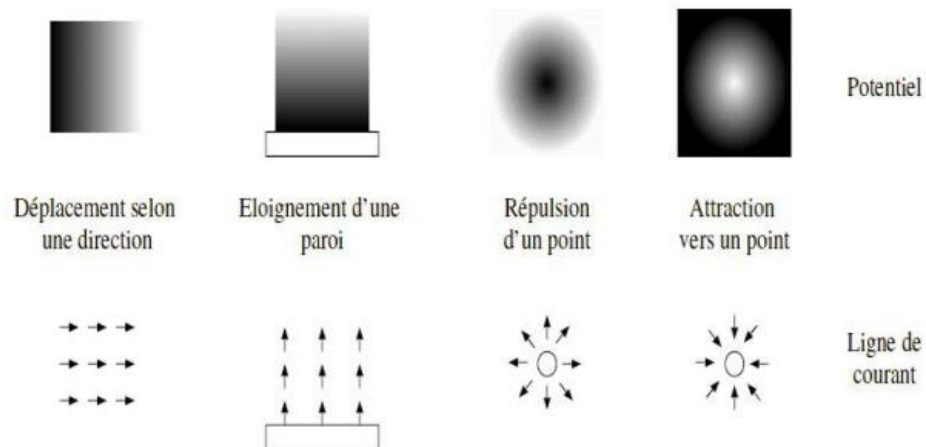


Figure 12 : Représentation des Champs de Potentiel et des Lignes de Courant

La combinaison donne la direction à prendre en chaque point de l'espace [34]

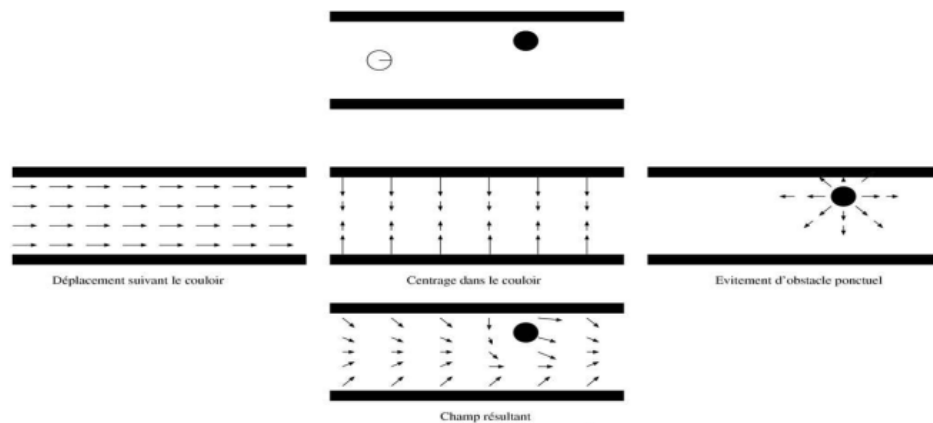


Figure 13 : Application de la Méthode du Champ Potentiel pour la Navigation dans un Couloir

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.3.2 Définition des champs attractifs et répulsifs

3.3.2.1 Champs attractifs :

En robotique, Un champ attractif est une force virtuelle qui attire le robot vers un objectif. Ces champs sont générés par des algorithmes de planification de trajectoire comme le potentiel artificiel.

Ils guident les robots vers des points d'intérêt en minimisant l'énergie et le temps nécessaires pour atteindre l'objectif.

3.3.2.2 Champs répulsifs :

Un champ répulsif est une force virtuelle qui éloigne le robot des obstacles ou des zones dangereuses. Générés par la détection d'obstacles via les capteurs du robot. Il est Utilisé pour éviter les collisions et maintenir une distance sécuritaire par rapport aux objets environnants.

En robotique, les champs attractifs attirent les robots vers des objectifs spécifiques, tandis que les champs répulsifs les éloignent des obstacles, facilitant une navigation autonome et efficace.

3.3.3 Méthodes pour représenter la cible et les obstacles dans le champ potentiel.

3.3.3.1 Représentation discrète :

Dans cette représentation l'environnement est divisé en une grille représentant les positions des obstacles et de la cible, et chaque cellule de la grille contient des informations sur la présence d'un obstacle ou de la cible et des attributs comme la distance à l'objectif.

C'est une approche simple et efficace pour les environnements en grille mais elle est limitée pour les environnements continus ou complexes [35]

3.3.3.2 Représentation continue :

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

Les obstacles et la cible sont représentés de manière continue avec des fonctions mathématiques ou des modèles probabilistes. Les obstacles sont représentés par des fonctions de coût, la cible par une fonction de potentiel attractif.

Approche flexible, mieux adaptée aux environnements complexes, mais nécessitant des calculs plus sophistiqués.[36]

3.3.3.3 Représentation basée sur des modèles géométriques :

Les obstacles sont représentés par des modèles géométriques comme des polygones, des cercles ou des segments de ligne. Les algorithmes de détection d'obstacles génèrent ces modèles à partir des données des capteurs.

Approche utilisée lorsque la géométrie des obstacles est connue ou facilement détectable. [37]

3.3.3.4 Représentation basée sur des cartes de coûts :

L'environnement est représenté par une carte de coûts, chaque cellule indiquant le coût de traverser cette zone. Les obstacles ont des valeurs de coût élevées, les zones libres des valeurs de coût plus faibles.

La cible est une zone de coût attractif, avec des valeurs de coût diminuant à mesure que le robot s'en rapproche. [38]

3.3.3.5 Représentation basée sur des modèles probabilistes :

Les obstacles et la cible sont représentés avec des modèles probabilistes prenant en compte l'incertitude. Les obstacles sont représentés par des distributions de probabilité de leur position et forme.

Les algorithmes de planification estiment les trajectoires les plus probables pour des mouvements sûrs et efficaces [39]

3.3.4 Calcul des forces attractives et répulsives

La méthode du champ de potentiel (PFM) utilise une analogie dans laquelle le robot est une particule se déplaçant dans l'espace de configuration sous l'influence d'un champ de forces. Alors que l'emplacement cible exerce une force qui attire la particule

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

F_{att} , les obstacles exercent des forces répulsives F_{rep} . À chaque instant t_i , le mouvement est calculé pour suivre la direction de la force artificielle induite par la somme des deux potentiels [33]

$F_{tot}(q_{ti}) = F_{att}(q_{ti}) + F_{rep}(q_{ti})$ (13) (la direction de mouvement la plus prometteuse).

$$F_{att}(q_{target}) = k_{att} n_{q_{target}} \quad (14)$$

- Cette équation représente la force attractive exercée sur le robot par la cible (destination).
- $n_{q_{target}}$ est un vecteur unitaire pointant de la position actuelle du robot vers la cible. Il indique simplement la direction de la cible par rapport au robot.
- K_{att} est une constante de proportionnalité contrôlant la force de l'attraction.

$$F_{rep} = \begin{cases} \sum_j K_{rep} \left(\frac{1}{d(q_{ti}, p_j)} - \frac{1}{d_0} \right) n_{p_j}, & \text{si } d(q_{ti}, p_j) < d_0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$$

Cette loi calcule la force répulsive totale exercée sur un robot en présence d'obstacles. Si la distance entre le robot (q_{ti}) et un obstacle (p_j) est inférieure à une certaine distance d'influence (d_0), alors cet obstacle exerce une force répulsive. La force répulsive exercée par chaque obstacle est proportionnelle à l'inverse de la distance entre le robot et l'obstacle, moins l'inverse de la distance d'influence. La somme de ces forces répulsives de tous les obstacles est calculée, et la direction de chaque force est donnée par le vecteur unitaire (n_{p_j}) pointant de la position actuelle du robot vers l'obstacle. Si la distance entre le robot et un obstacle est supérieure à d_0 , alors cet obstacle n'a pas d'effet significatif sur la force répulsive totale. Dans ce cas, la force répulsive totale est nulle (0).[33]

$$F_{rep}(q_{ti}) = \begin{cases} K_{rep} \sum_j \left(\frac{a q_{ti}}{(2ad(q_{ti}, p_j)) - q_{ti}^2} \right) n_{p_j} \cdot n_{q_{ti}}, & \text{if } q_{ti} > 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$$

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

L'expression est utilisée pour modéliser un potentiel répulsif dans le contexte d'une planification de trajectoire pour un robot mobile autonome.

- a) $\dot{\mathbf{q}}_{ti}$ Représente la vitesse actuelle du robot. C'est la dérivée de \mathbf{q}_{ti} par rapport au temps.
- b) $\mathbf{n}_{\dot{\mathbf{q}}_{ti}}$ représente le vecteur unitaire dans la direction de la vitesse du robot. Cela signifie que $\mathbf{n}_{\dot{\mathbf{q}}_{ti}}$ indique la direction dans laquelle le robot se déplace.
- c) \mathbf{a} représente l'accélération maximale du véhicule, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le véhicule peut changer de vitesse.

L'expression donnée pour $F_{rep(q_{ti})}$ est utilisée pour calculer un potentiel répulsif basé sur l'estimation du temps jusqu'à une collision et le temps nécessaire pour arrêter le robot mobile. Plus précisément :

- L'expression utilise la vitesse actuelle du robot ($\dot{\mathbf{q}}_{ti}$) et la compare avec la direction de déplacement ($\mathbf{n}_{\dot{\mathbf{q}}_{ti}}$)
- Elle calcule la puissance de $\mathbf{a} \times \dot{\mathbf{q}}_{ti}$, ce qui est potentiellement lié à la capacité du robot mobile à éviter une collision en modifiant sa vitesse dans la direction spécifiée.
- Le terme $\left(\left(2ad(\mathbf{q}_{ti}, \mathbf{p}_j) \right) - \dot{\mathbf{q}}_{ti}^2 \right)$ représente une estimation du temps jusqu'à une collision moins le temps nécessaire pour arrêter, où \mathbf{p}_j est probablement une variable représentant des obstacles ou des points de référence dans l'environnement.
- Enfin, le résultat est pondéré par F_{rep} et \mathbf{p}_j , qui pourraient être des coefficients de pondération pour ajuster l'importance de ce potentiel répulsif par rapport à d'autres facteurs dans la planification de la trajectoire.

Globalement, cette expression est utilisée pour calculer un potentiel répulsif qui influence la planification de trajectoire d'un véhicule autonome en tenant compte de la vitesse actuelle, de la direction de déplacement et de l'accélération maximale du robot mobile. [30]

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

3.3.5 Stratégies pour éviter les minima locaux

3.3.5.1 Compréhension des minima locaux

Les minima locaux représentent des configurations dans l'espace de configuration où la fonction de coût ou de potentiel atteint un minimum local, mais pas nécessairement le minimum global. Ils peuvent se produire en raison de la disposition des obstacles et des caractéristiques de la fonction de potentiel utilisée pour la planification de trajectoire.

3.3.5.2 Impact des minima locaux sur la navigation des robots mobiles

Les minima locaux peuvent avoir un impact significatif sur la navigation des robots mobiles, affectant leur capacité à atteindre efficacement les objectifs souhaités. Lorsque le robot est piégé dans un minimum local, il sera incapable de trouver une trajectoire optimale vers sa destination, ce qui entraîne des retards, des itérations supplémentaires et une consommation d'énergie accrue. [40]

3.3.5.3 Approches pour éviter les minima locaux

Pour éviter les minima locaux, plusieurs approches peuvent être utilisées à savoir

A) Algorithmes de recherche avancés :

Ces algorithmes complètent la méthode du champ potentiel en permettant de sortir des minima locaux. Parmi ces algorithmes, on trouve :

- a) **Algorithmes de recherche globale** : Tels que les algorithmes génétiques, le recuit simulé (**simulated annealing**), ou les algorithmes de colonies de fourmis, qui explorent l'espace de recherche de manière plus exhaustive et peuvent échapper aux minima locaux. [41]

b) **RRT (Rapidly-exploring Random Tree):**

Cet algorithme construit un arbre en explorant l'espace de manière aléatoire et peut être combiné avec la méthode du champ potentiel pour améliorer la recherche de chemin. [42]

Chapitre 3 : Planification de trajectoire d'un robot mobile

c) *A ou D Lite* :

Ces algorithmes de recherche de chemin peuvent être utilisés pour planifier globalement le chemin, tandis que la méthode du champ potentiel est utilisée pour le contrôle local [43,44]

B) **Perturbations aléatoires** :

Introduire des perturbations aléatoires dans le mouvement du robot peut aider à sortir des minima locaux en ajoutant une composante stochastique au gradient de descente. [45]

C) **Navigation par potentialité ajustable** :

Cette technique ajuste dynamiquement les paramètres du champ potentiel pour réduire l'influence des obstacles à proximité lorsque le robot est piégé dans un minimum local. [46]

D) **Hybridation avec d'autres méthodes de planification** :

Combiner la méthode du champ potentiel avec d'autres méthodes de planification de chemin, comme la planification de trajectoire basée sur des cartes de coût, peut aussi aider à éviter les pièges des minima locaux. [47]

3.3.5.4 Importance de la prise en compte des minima locaux dans la conception des algorithmes de navigation

Il est essentiel de tenir compte des minima locaux lors de la conception d'algorithmes de navigation pour les robots mobiles. En mettant en œuvre des stratégies efficaces pour les éviter, on peut améliorer la robustesse, la fiabilité et les performances des systèmes de navigation des robots mobiles dans divers environnements. Une compréhension approfondie des minima locaux et l'utilisation de techniques appropriées pour les surmonter sont donc des éléments clés pour une planification de trajectoire réussie des robots mobiles.

CHAPITRE 4 : SIMULATION MATLAB

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

Le code MATLAB présente la simulation d'un robot mobile évoluant dans un environnement simple ou un environnement avec des obstacles. Le robot peut fonctionner en mode manuel ou en mode automatique.

4.1 Contexte et Objectifs

4.1.1 Contexte de la simulation.

Le script simule le mouvement d'un robot mobile dans un espace défini, visualisé par une figure dans MATLAB. L'environnement comprend des obstacles représentés par des rectangles. Le robot commence à une position initiale et peut se déplacer vers des points cibles définis dans cet environnement. Le script a pour but de simuler le mouvement d'un robot mobile dans un environnement complexe, offrant différentes méthodes de contrôle et de navigation, allant du contrôle manuel à une navigation autonome plus avancée basée sur le champ potentiel.

4.1.2 Objectifs de la simulation.

Le script de simulation propose trois modes de fonctionnement distincts, chacun offrant une méthode différente pour contrôler le robot et observer son comportement dans l'environnement.

4.1.2.1 Contrôle manuel du robot Mode 1 :

Permet à l'utilisateur de contrôler manuellement les vitesses des roues gauche et droite du robot à l'aide de sliders. Cela permet d'observer comment le robot se déplace dans l'environnement.

4.1.2.2 Navigation automatique vers des points cibles Mode 2 :

Le robot navigue automatiquement vers une série de points cibles prédéfinis. Il ajuste sa trajectoire en fonction de la direction vers le point cible et des obstacles présents dans l'environnement.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.1.2.3 Navigation avec champ potentiel Mode 3 :

Implémente une navigation plus sophistiquée en utilisant des algorithmes de champ potentiel. Ceux-ci calculent les forces attractives et répulsives qui guident le mouvement du robot vers le point cible tout en évitant les obstacles. Cette approche permet au robot de réagir dynamiquement aux changements dans l'environnement et de s'adapter en conséquence pour atteindre son objectif.

4.2 Mode Manuel

4.2.1 Description

4.2.1.1 fonctionnements du mode manuel

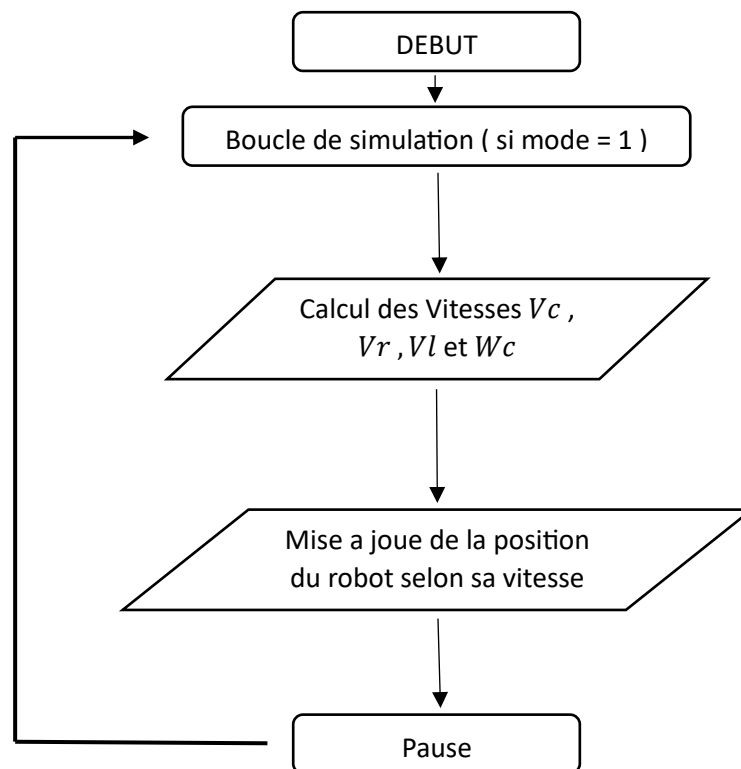


Figure 14 : Boucle de simulation manuelle (Mode 1)

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

Cette boucle (**Figure 14**) while implémente le contrôle en temps réel d'un robot différentiel, simulant son mouvement basé sur les vitesses de ses roues.

Elle récupère les vitesses des roues droite (**Vr**) et gauche (**Vl**) depuis les curseurs de l'interface utilisateur, avec la fonction *get*, qui les récupère depuis la fonction *updatespeedsVR/VL* (**Figure 15**), En utilisant ces vitesses, elle calcule la vitesse linéaire centrale (**Vc**) et la vitesse angulaire (**Wc**) du robot. En fonction de ces vitesses, elle met à jour la position et l'orientation du robot.

Si les vitesses des roues sont différentes, le robot suit une trajectoire courbe en ajustant ses coordonnées (**x, y**) et son angle **theta**.

Si les vitesses des roues sont égales, le robot avance en ligne droite sans modifier son orientation.

Elle actualise l'affichage du robot en pivotant son image pour correspondre à la nouvelle orientation et en ajustant sa position. Pour simuler le temps réel, elle réalise une pause de durée **delta_t**, assurant un mouvement fluide et continu du robot.

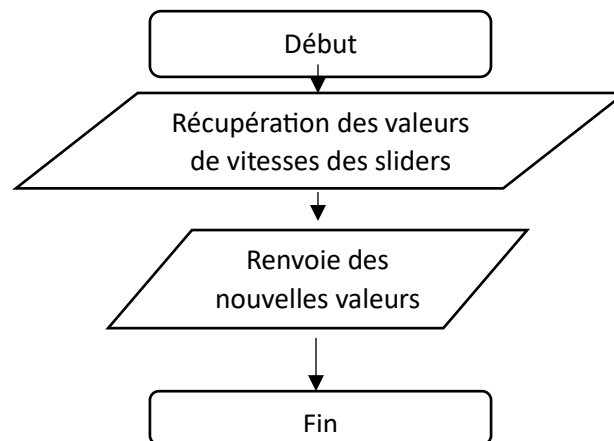


Figure 15 : Fonction qui met à jour la valeur des vitesses des roues en utilisant les sliders

4.2.1.2 l'interface utilisateur et les contrôles utilisés.

L'interface (**Figure 16**) utilisateur du mode manuel est conviviale et intuitive. Elle propose des sliders qui permettent à l'utilisateur de régler les vitesses des roues. Ces contrôles interactifs offrent une visualisation claire des ajustements effectués en temps réel.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

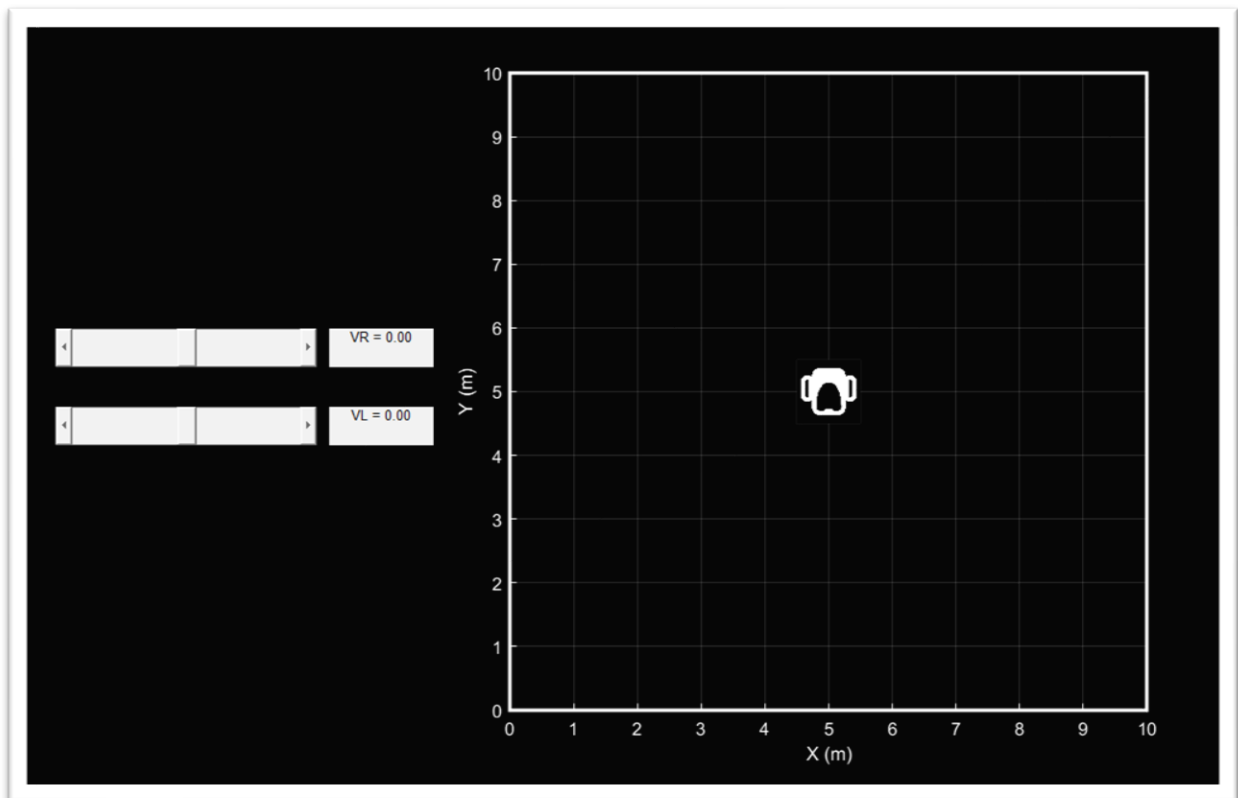


Figure 16 : Interface de simulation du mode manuelle (mode 1)

4.2.2 Résultats et Analyse

4.2.2.1 résultats obtenus avec ce mode.

Dans le mode manuel, l'utilisateur peut ajuster les vitesses des roues du robot à l'aide de sliders interactifs, permettant un contrôle direct et en temps réel du mouvement. Les résultats obtenus dépendent largement des décisions prises par l'utilisateur pour régler les vitesses des roues.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.2.2.2 Analyser les avantages et les limitations

Concernant les avantages, ce mode de contrôle offre une grande flexibilité et une capacité d'adaptation, idéale pour des tâches variées et imprévues. Il permet également un contrôle précis du robot, améliorant la sécurité en permettant à l'opérateur de réagir rapidement aux problèmes et de prévenir les accidents.

Cependant, il présente également des limitations. L'opérateur peut ressentir de la fatigue lors de manipulations prolongées, affectant sa performance et augmentant le risque d'erreurs.

De plus, la réactivité humaine peut ne pas être suffisante dans des situations complexes ou dangereuses, nécessitant une formation spécifique pour manipuler le robot efficacement et en toute sécurité. En outre, le contrôle manuel peut entraîner des coûts de main-d'œuvre plus élevés et une efficacité réduite pour certaines tâches répétitives.

Malgré ces limitations, le mode manuel reste indispensable pour des tâches précises et adaptatives, nécessitant un équilibre entre le contrôle manuel et l'automatisation pour optimiser l'utilisation des robots en fonction des besoins spécifiques des missions et des environnements.

4.3 Mode de Planification de Trajectoire

4.3.1 Description

4.3.1.1 méthodes de planification de trajectoire utilisées.

Dans ce mode de planification de trajectoire, le robot suit une série de points cibles prédéfinis pour atteindre une destination finale. La méthode que nous avons utilisée consiste à définir explicitement les positions successives que le robot doit atteindre. Ces points de contrôle permettent de guider le robot le long d'une trajectoire planifiée.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.3.1.2 algorithmes ou techniques spécifiques employés.

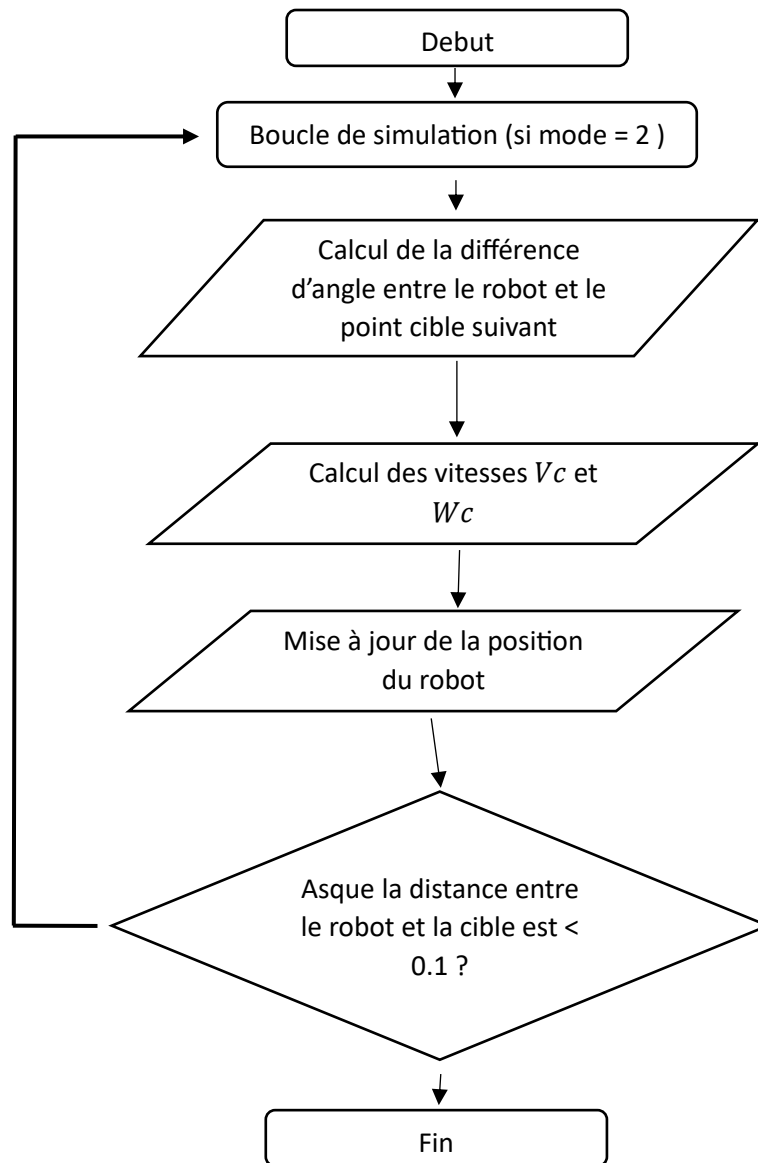


Figure 17 : Boucle de simulation planification de la trajectoire Mode 2

Le code (**Figure 17**) simule le déplacement d'un robot vers plusieurs points cibles spécifiés par leurs coordonnées. Pour chaque point cible dans **points_cibles**, la boucle commence par initialiser les coordonnées du point cible **x_cible** et **y_cible**.

Le robot se déplace vers chaque point cible, dans cette boucle le robot calcule la direction et la distance vers le point cible. Pour déterminer la direction, il utilise atan2

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

pour calculer l'angle **theta_cible** entre sa position actuelle et le point cible. La différence entre l'angle actuel du robot, **theta**, et **theta_cible** est ensuite calculée et normalisée pour qu'elle soit entre $-\pi$ et π .

Ensuite, le code détermine les vitesses de déplacement du robot. La vitesse de translation, **Vc**, est fixée à une valeur constante (par exemple, 1). Cette vitesse représente la vitesse de déplacement du robot vers l'avant. La vitesse angulaire, **Wc**, est proportionnelle à la différence d'angle **theta_diff**, ce qui permet au robot de tourner pour s'aligner avec le point cible.

Le code utilise un modèle différentiel pour calculer les vitesses des roues gauche (**Vl**) et droite (**Vr**) du robot en fonction de **Vc**, **Wc**, et la distance entre les roues, **R**. Ensuite, la position (**x**, **y**) et l'orientation (**theta**) du robot sont mises à jour en intégrant les vitesses calculées sur une période de temps, **delta_t**.

Pour visualiser le mouvement du robot, les nouvelles coordonnées sont ajoutées à une liste qui trace la trajectoire suivie. Cette trajectoire est affichée en temps réel, et l'image du robot est mise à jour pour refléter sa nouvelle orientation. Une pause (**pause(delta_t)**) est incluse pour simuler l'écoulement du temps, permettant de voir l'animation du mouvement.

Enfin, la boucle vérifie si le robot est assez proche du point cible, c'est-à-dire si la distance au point cible est inférieure à une certaine tolérance (par exemple, 0.1). Si cette condition est remplie, le robot considère le point cible comme atteint, affiche des informations pertinentes, et sort de la boucle pour passer au point cible suivant.

4.3.2 Résultats et Analyse

4.3.2.1 résultats obtenus avec ce mode.

Les résultats de ce mode montrent que le robot est capable de suivre les points cibles de manière relativement précise, atteignant chaque point cible successivement jusqu'à la destination finale. La trajectoire suivie par le robot est tracée et peut être visualisée, permettant une analyse visuelle de l'efficacité de la planification.

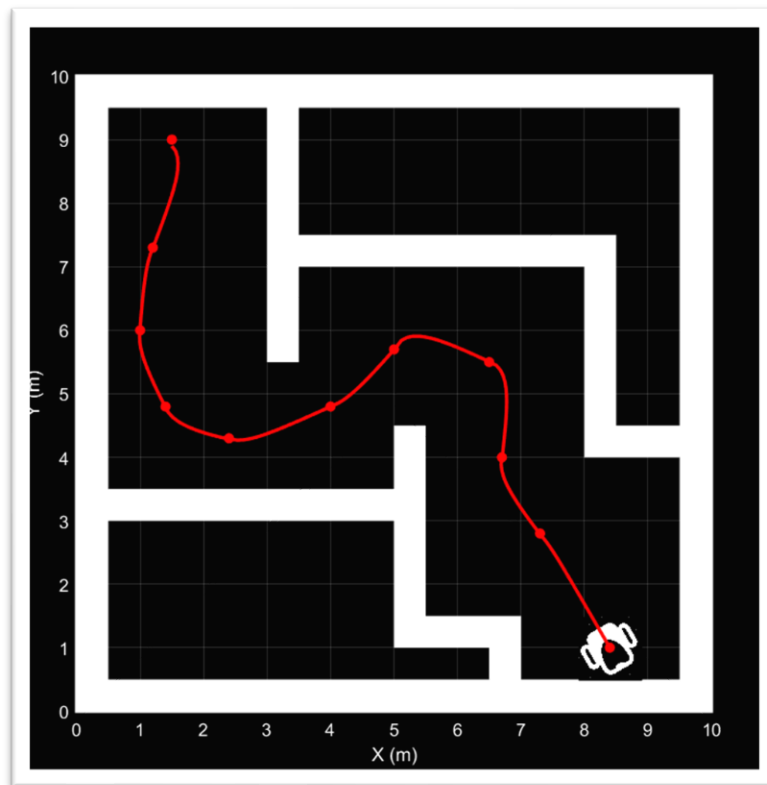


Figure 18 : Résultat de simulation de planification de trajectoire mode 2

4.3.2.2 Analyser les avantages et les limitations

La méthode de suivi de points cibles est simple à implémenter et robuste pour des trajectoires prédéfinies dans un environnement statique. Le robot peut atteindre des points spécifiques avec une bonne précision, ce qui est utile pour des tâches de navigation précises.

Cependant, la trajectoire est fixe et ne peut pas s'adapter en temps réel à des changements dans l'environnement, tels que des obstacles dynamiques. Contrairement à des méthodes plus sophistiquées comme la planification dynamique avec évitement d'obstacles, ce mode ne prend pas en compte les obstacles imprévus, ce qui peut poser des problèmes en environnement non contrôlé.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

De plus, la réussite de la trajectoire dépend fortement de la vitesse angulaire et linéaire du robot. Une mauvaise configuration de ces vitesses peut conduire à des trajectoires inefficaces ou même à l'échec de la navigation.

4.4 Mode d'Évitement d'Obstacles avec la Méthode du Champ Potentiel

4.4.1 Description

4.4.1.1 méthodes de planification de trajectoire utilisée

L'algorithme de planification de trajectoire par champ potentiel utilise des forces attractives et répulsives pour guider le robot vers sa destination tout en évitant les obstacles. Les forces attractives attirent le robot vers l'objectif final, tandis que les forces répulsives le repoussent des obstacles.

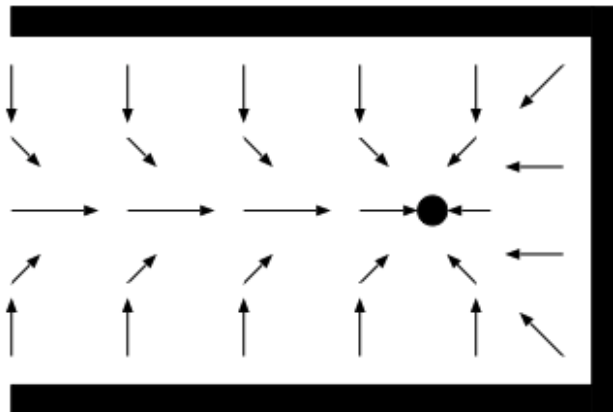


Figure 19 : Navigation dans un Couloir avec Évitement d'Obstacle par la Méthode du Champ Potentiel

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.4.1.2 Étapes de l'algorithme.

A) Initialisation des obstacles et du point cible

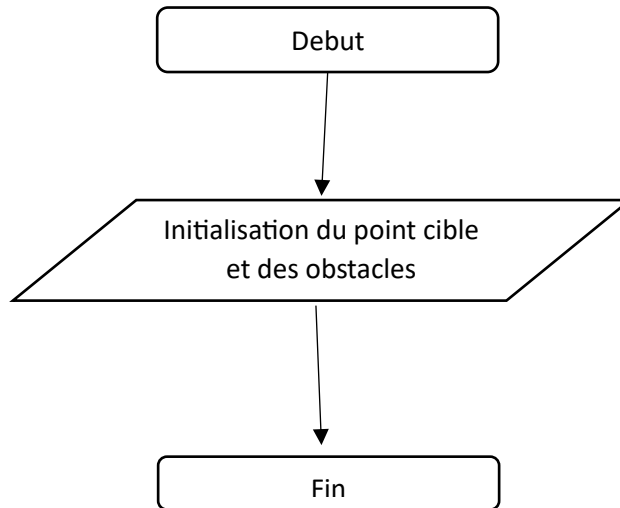


Figure 20 : Initialisation des obstacles et du point cible

B) calcul les forces attractives, répulsive et totale

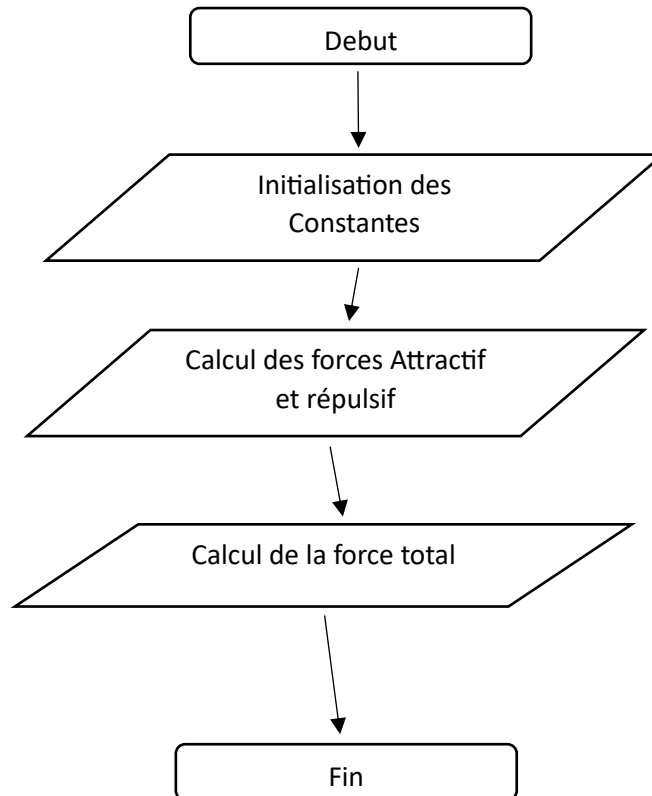


Figure 21 : Fonction qui calcul les forces attractives, répulsive et totale

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

C) conversion des forces calculées en vitesses linéaire et angulaire

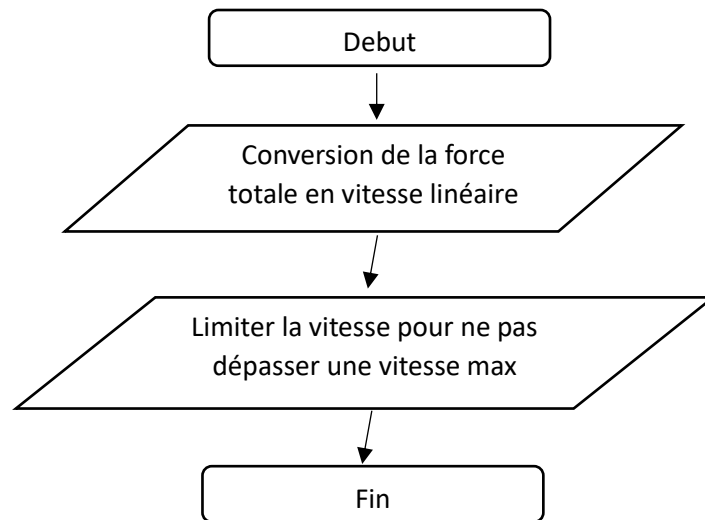


Figure 22 : Fonction qui convertit les forces calculées en vitesses linéaire et angulaire

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

D) Appel des fonctions et mise à jour de la position et orientation du robot grâce à la boucle de simulation

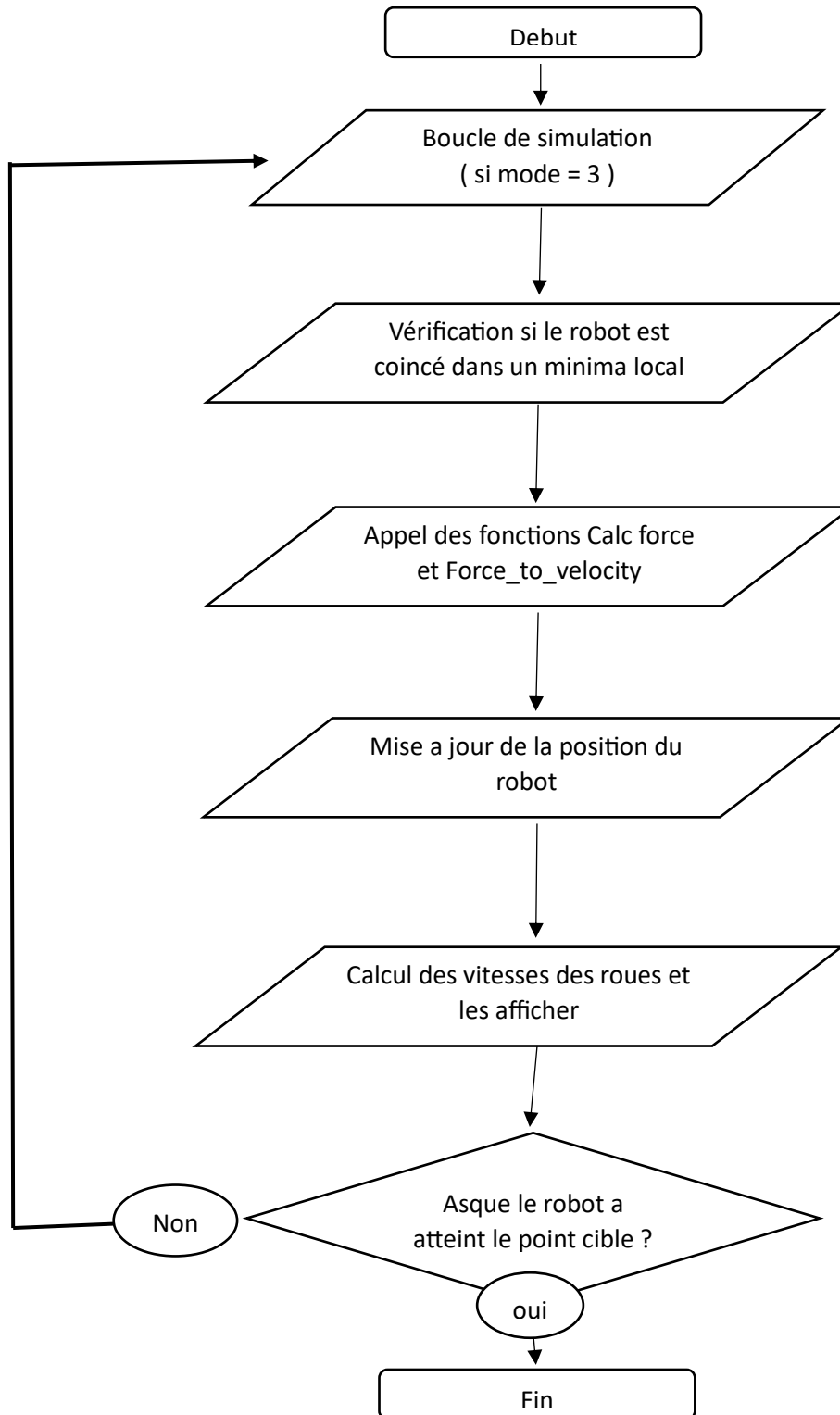


Figure 23 : Boucle de simulation avec champ potentiel mode 3

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

- a) **Initialisation des paramètres** : On commence par définir les positions de l'objectif et des obstacles. **(Figure 20)**

- b) **Calcul des forces attractives** : La force attractive est calculée en fonction de la distance entre le robot et l'objectif, Plus le robot est loin, plus la force est grande. **(Figure 21) (Équation 14)**

- c) **Calcul des forces répulsives** : Les forces répulsives sont calculées en fonction de la proximité des obstacles. Plus le robot est proche d'un obstacle, plus la force répulsive est forte. **(Figure 21) (Équation 15)**

- d) **Combinaison des forces** : On combine les forces attractives et répulsives pour convertir les forces et déterminer la direction et la vitesse de déplacement du robot. **(Figure 22) (Figure 21) (Équation 13)**

- e) **Mise à jour de la position** : La position du robot est mise à jour en fonction de la force résultante. **(Figure 23)**

- f) **Itération** : On répète les calculs jusqu'à ce que le robot atteigne l'objectif. **(Figure 23)**

4.4.1.3 Gestion des cas spéciaux et des situations imprévues

L'algorithme gère certaines situations imprévues, notamment les minima locaux où le robot peut se retrouver coincé dans un point où les forces se neutralisent ou à tourner en boucle.

A) Application de perturbation aléatoire

La solution proposée consiste à d'abord détecter les deux cas, blocage ou boucle de rotation, pour ça on aura besoin d'abord de garder en historique les positions précédentes pour détecter le problème. Le programme conserve un historique des positions précédentes du robot, À chaque itération de la boucle principale, la position actuelle du robot est ajoutée à cet historique.

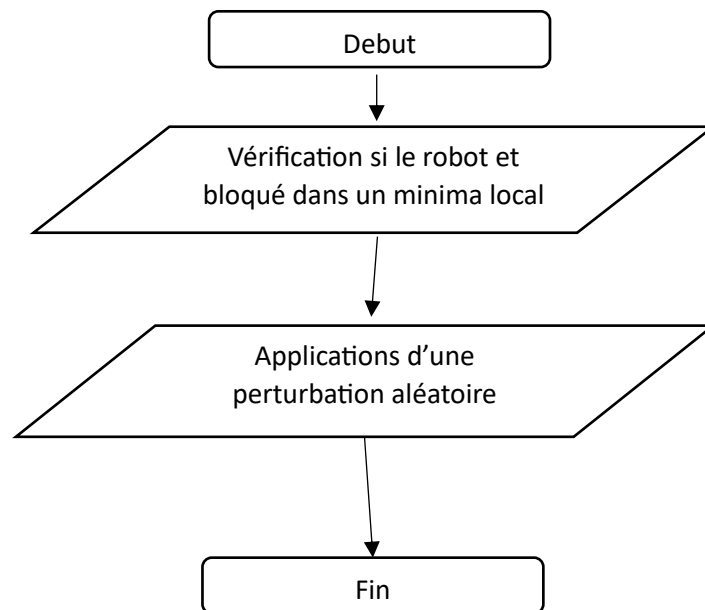


Figure 24 : Fonction de déblocage du robot `check_for_loop` et `check_if_stuck`

a) Détection de boucle :

- **Fonction :** `check_for_loop`
- **Description :** Pour détecter si le robot revisite une position déjà visitée, le programme calcule la distance entre la position actuelle du robot et ses positions passées.
- **Critère :** Si une des distances entre la position actuelle et les positions passées (excluant les plus récentes pour éviter les fluctuations rapides) est inférieure à un seuil prédéfini (`loop_threshold`), le robot est considéré comme étant en boucle.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

b) Détection de blocage :

- **Fonction:** `check_if_stuck(prev_positions, pos_robot, threshold)`
- **Description :** Pour détecter si le robot est bloqué, le programme calcule la distance moyenne parcourue au cours des dernières itérations.
- **Critère :** Si cette distance moyenne est inférieure à un seuil prédéfini (`stuck_threshold`), le robot est considéré comme bloqué.

Une fois la détection faite on applique les perturbations aléatoires en temps réel pour garder la continuité de la simulation, Si le robot est détecté comme étant bloqué par l'une ou l'autre des méthodes, le programme applique une perturbation aléatoire à l'angle de direction du robot.

L'objectif est d'introduire une variation dans le mouvement du robot pour le débloquent de sa situation, le calcul de La perturbation est calculé en ajoutant un angle aléatoire compris entre *-random_perturbation_strength* et *random_perturbation_strength* à l'angle de direction actuel du robot.

Après avoir appliqué la perturbation, la simulation se poursuit normalement, le processus de détection de blocage ou de boucle est répété à chaque itération de la boucle principale.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.4.2 Résultats et Analyse

4.4.2.1 résultats obtenus avec ce mode.

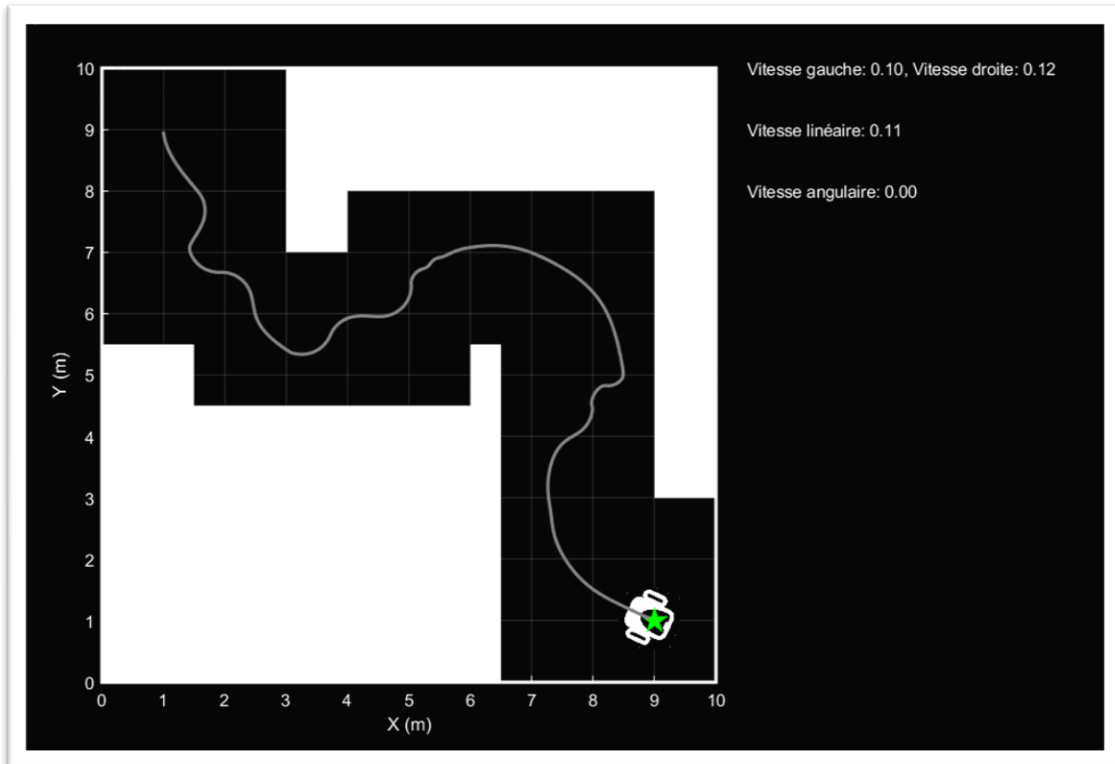


Figure 25 : Simulation avec application de champ potentiel mode 3

Les résultats montrent que l'algorithme de champ potentiel permet au robot de naviguer efficacement vers l'objectif tout en évitant les obstacles. Le robot suit une trajectoire fluide et continue, réagissant de manière appropriée aux obstacles statiques. Des simulations et des tests ont démontré que le robot pouvait atteindre des cibles dans des environnements complexes avec divers obstacles.

Chapitre 4 : Simulation MATLAB

4.4.2.2 Analyse

L'algorithme de champ potentiel a plusieurs avantages, dont sa réactivité et sa simplicité de mise en œuvre. Le robot réagit rapidement aux changements dans l'environnement grâce à la nature continue des calculs de forces, et l'algorithme est relativement simple à implémenter sans nécessiter de planification complexe préalable.

Cependant, il a aussi des limitations. Le robot peut se retrouver bloqué dans des minima locaux, nécessitant des mécanismes supplémentaires pour le sortir de ces situations.

La complexité de l'algorithme peut augmenter avec le nombre et la disposition des obstacles, affectant les performances en temps réel. De plus, dans des environnements très encombrés ou dynamiques, la capacité du robot à éviter les obstacles de manière optimale peut être limitée, nécessitant des ajustements ou des compléments à l'algorithme de base.

En conclusion, la méthode de planification de trajectoire par champ potentiel offre une bonne réactivité et une mise en œuvre relativement simple, mais elle doit être complétée par des stratégies de gestion des minima locaux et des obstacles dynamiques pour améliorer sa robustesse et son efficacité.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a examiné en détail les divers aspects de la robotique mobile, en tenant compte à la fois des concepts théoriques et des applications concrètes.

Tout d'abord, les principes essentiels de la robotique mobile ont été exposés, incluant une catégorisation des différents types de robots et leurs différentes applications. Cette partie a établi les fondations nécessaires pour appréhender les évolutions futures.

Dans un second temps, le mémoire a examiné en détail la conception des robots mobiles, en mettant l'accent sur les modèles cinématiques qui sont indispensables pour développer des algorithmes de contrôle appropriés. Il est essentiel de réaliser cette modélisation afin de permettre aux robots de se déplacer de manière autonome.

La troisième partie a abordé la planification de trajectoire. Différentes techniques et méthodes ont été étudiées afin de mettre en évidence les diverses approches qui permettent aux robots de naviguer dans des environnements complexes. Les méthodes de champ potentiel ont été particulièrement valorisées pour leur facilité et leur efficacité, même si certaines contraintes telles que les minima locaux ont été mises en place.

La conclusion du mémoire a abordé les applications concrètes et les simulations effectuées avec Matlab. L'efficacité des algorithmes de contrôle et de navigation a été confirmée par ces simulations, tout en mettant en évidence les bénéfices et les limites des diverses méthodes.

En résumé, cette étude a mis en évidence les compétences théoriques et pratiques acquises lors de notre formation, en proposant une vision globale claire de la robotique mobile. Les obstacles rencontrés et les solutions suggérées offrent des opportunités intéressantes pour des recherches à venir et des avancées dans ce domaine en perpétuelle évolution.

Bibliographie

- [1] Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). Springer Handbook of Robotics. Springer.
- [2] Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. R. (2004). Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press.
- [3] Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. E., & Thrun, S. (2005). Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. MIT Press.
- [4] Koren, Y., & Borenstein, J. (1988). Potential Field Methods and their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation. IEEE Conference on Robotics and Automation.
- [5] <https://www.gotronic.fr/blog/wp-content/uploads/2018/11/Histoire-de-la-robotique.pdf>
- [6] <https://www.usine-digitale.fr/article/bios-de-robots-1950-la-naissance-de-l-intelligence-artificielle.N277018>
- [7] <http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2002/robotique/chapitres/Buts.htm>
- [8] <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/14/6951>
- [9] <https://www.kivnon.com/fr/mobile-robots-and-assembly-lines-what-are-the-benefits/>
- [10] <https://www.robotique.tech/blog/les-inconvenients-des-robots-dans-la-vie-quotidienne/>
- [11] <https://info.sensopart.com/fr/robotics/mobile-vs-stationary-robots#:~:text=Les 20robots 20fixes 20et 20mobiles,et 20ind C3 A9pendant e 20de 20l'emplacement.>
- [12] <https://fsbsa.ummto.dz/bitstreams/bfcea10ca-11b2-4e52-b540-c9039a3939f5/download>
- [13] Ilon, B. E. (1975). "Wheels for a Course Stable Self-Propelling Vehicle Movable in any Desired Direction on the Ground or Some Other Base". US Patent 3876255.
- [14] LaValle, S. M. (2006). Planning Algorithms. Cambridge University Press.
- [15] Borenstein, J., Everett, H. R., & Feng, L. (1996). Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques. A K Peters/CRC Press.
- [16] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press.
- [17] 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.

- [18] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press. [19] Planning Algorithms. LaValle, S. M. (2006). Cambridge University Press.
- [20]<https://youtu.be/6nrEMGuA9qU?si=z0ALTvAVWn7N2NbR>
- [21]https://youtu.be/XG4cODYVbJk?si=BBWDwegBTgy_s33I
- [22]<https://www.made-for-science.com/en/quanser/?df=made-for-science-quanser-qbot-2-quarc-coursewarestud-matlab.pdf>
- [23] Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. E., & Thrun, S. (2005). Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. MIT Press.
- [24]<https://www.cambridge.org/core/books/planning-algorithms/FC9CC7E67E851E40E3E45D6FE328B768>
- [25]<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1596/1/MEZAACHE.Ibrahim.pdf>
- [26]<https://ieeexplore.ieee.org/document/508439>
- [27]<https://webdiis.unizar.es/~jminguez/TRAND.pdf>
- [28]https://www.researchgate.net/publication/257213887_Motion_Planning_in_Dynamic_Environments_Using_Velocity_Obstacles
- [29]https://www.researchgate.net/publication/3344494_The_Dynamic_Window_Approach_to_Collision_Avoidance
- [30]<https://link.springer.com/article/10.1007/s10514-009-9150-y>
- [31] Khatib, O. (1986). "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots". The International Journal of Robotics Research, 5(1), 90-98.
- [32] Latombe, J.-C. (1991). Robot Motion Planning. Springer.
- [33] <https://dokumen.pub/springer-handbook-of-robotics.html>
- [34]<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1596/1/MEZAACHE.Ibrahim.pdf>
- [35] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). Probabilistic Robotics. MIT Press.
- [36] Khatib, O. (1986). "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots". The International Journal of Robotics Research, 5(1), 90-98.
- [37] Latombe, J.-C. (1991). Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers.
- [38] Stentz, A. (1994). "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3310-3317.
- [39] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). Probabilistic Robotics. MIT Press.
- [40] Latombe, J.-C. (1991). Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers.

- [41] Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- [42] LaValle, S. M., & Kuffner, J. J. (2001). "Randomized Kinodynamic Planning". *International Journal of Robotics Research*, 20(5), 378-400.
- [43] Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths". *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- [44] Koenig, S., & Likhachev, M. (2002). "D* Lite". *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, 476-483.
- [45] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- [46] Khatib, O. (1986). "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots". *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), 90-98.
- [47] Stentz, A. (1994). "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments". *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3310-3317.
- [48] Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press.
- [49] Borenstein, J., Everett, H. R., & Feng, L. (1996). *Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques*. A. K. Peters Ltd.
- [50] LaValle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.