

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaâma Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** En automatique

Spécialité : Automatique et Informatique industrielle

Thème :

**Etude et simulation dans le cadre d'une coopération
de deux mobiles manipulateurs**

Présenté par :

Mr BOUHAMOUCHE Messaoud

Mr HAMLAOUI Mohamed Taj Eddine

Devant le jury composé de :

Mr CHOUYA Ahmed

Mr IKNI Samir

Mr BOUKLI HACENE Omar

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2018/2019

Dédicace



Je dédie cet humble travail avec grand amour, sincérité et fierté :

A mes chers parents, source de tendresse, de noblesse et d'affectation.

A mon frère anis et à mes sœurs Thinyouren et sarah en témoignage de la fraternité, avec mes souhaits de bonheur et de succès.

Et à tous les membres de ma famille surtout ma grande mère.

Et Mr Moussaoui Smail

A Mon grand frère et enseignant Ikni Samir

Et tous mes amis Koukou, Hamza, amer, Kaci, Mezian, Daoud, loucif, Lounes, Taher, Nawel Y, Aicha, Khiero, islam, Moh, Moh, Gjallal et à tout qui compulse ce modeste travail.

A mon binôme Taj Eddine.

A toute la promotion 2019 (Master II AII).

M. Bouhamouche

Dédicace



*Louange à dieu le tout puissant, prière et salut sur le prophète
Mohamed que le salut sur lui.*

Je remercie dieu et grâce à lui que je suis arrivée à ce niveau.

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère qui m'encouragent beaucoup.

Mes frères.

Tous les membres de ma grande famille.

Mon Frère d'un notre mère Messaoud. .

A Tous mes collèges de l'université et du département surtout.

*Toute personne ayant participé de loin ou de près pour la
réalisation de ce travail*

H. M Taj Eddine

Remerciements



*Nous tenons tout d'abord à remercier **DIEU** qui nous a donné la force et La patience d'accomplir ce modeste travail.*

Je tiens à exprimer notre très grande gratitude et profonds respects à Mr Ikni Samir, notre encadreur pour l'aide précieuse qu'il nous a apporté tout au long de ce travail, nous le remercions pour nous avoir inculqué le sens de travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants de l'automatique pour tout le savoir que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation, ainsi qu'à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Nous adressons nos chaleureux remerciements au Mr : Moussaoui Smail pour son aide, ses conseils durant toute la période de l'université.

Nous tenons à remercier énormément nos pères qui ont été plus que pères, ils étaient des amis et des frères.

Nombreuses sont les personnes qui nous ont apporté l'aide et leurs soutient, sans citer leurs noms, nous tenons à leurs présenter nos remerciements les plus sincères.



Résumé

Ce travail est consacré à l'étude et à la modélisation des robots manipulateurs mobiles en vue d'application des techniques permet d'assurer aux robots de réaliser une certaine coopération, dont on s'est limité à ce que l'un des robots suis une trajectoire désiré est génère une trajectoire au deuxième robot.

Mots clés : coopération, robot manipulateur, suivie de trajectoire, robot mobile.

المخلص

هذه الأطروحة مكرسة لدراسة ونمذجة طريقة تعاون الروبوتات المتنقلة من أجل تطبيق التقنيات التي تضمن لهذه الروبوتات تحقيق هذا التعاون، والذي يقتصر على منح مسار لأحد الروبوتات ليتبعه وبدوره سيقوم بإنشاء مسار يسمح للروبوت الثاني بإتباعه.

الكلمات المفتاحية: التعاون، الروبوت المناور، تتبع المسار، روبوت المتنقل.

Summary

This work is devoted to the study and modelling of mobile manipulators robots for the application of techniques ensures that the robots achieve a distinct cooperation, which we have limited ourselves to the fact that one of the robots follows a desired trajectory and generates a trajectory to the second robot.

Keywords: cooperation, manipulator robot, trajectory tracking, mobile robot.

Table des matières

Introduction général	1
Chapitre 1 : Terminologie des manipulateurs mobiles.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Constituants mécanique des robots manipulateurs.....	3
1.2.1 Espace articulaire.....	4
1.2.2 Espace opérationnel.....	4
1.2.3 Redondance.....	4
1.2.4 Configurations singulière.....	5
1.3 Catégories des robots.....	5
1.3.1 Les manipulateurs.....	5
1.3.2 Les télémanipulateurs.....	5
1.4 Les robots mobiles.....	6
1.4.1 Définition d'un robot mobile.....	6
1.4.2 Classification des robots mobiles.....	6
1.5 Perception des robots mobile.....	6
1.6 La structure des robots mobiles.....	7
1.6.1 La structure mécanique.....	7
1.6.2 Types des roues.....	9
1.6.3 Les contraintes des robots mobiles.....	11
1.7 Les systèmes multi robot.....	13
1.7.1 Les types des systèmes multi-robots.....	14
1.8 Motivations pour les systèmes multi-robots coopératifs.....	14
1.9 L'interaction dans les SMR.....	15
1.9.1 Types d'interaction.....	15
1.10 Coopération.....	16

1.10.1 Les taches coopératives :	16
1.10.2 Type de coopération	17
1.10.3 Mécanisme de coopération	18
1.10.4 Approche des sciences vivantes	19
1.10.5 Approche automatique :	19
1.10.6 Robotique collective	19
1.10.7 Les critères de performance du système	19
Conclusion...	21
Chapitre 2 : Modélisation des manipulateurs mobiles	22
1.1 Introduction :	22
1.2 Modélisation du bras manipulateur :	22
1.2.1 Modèle géométrique :	22
1.3 Modèle cinématique :	25
1.3.1 Modèle cinématique direct :	25
1.4 Modélisation de la plate-forme mobile :	26
1.5 Modèle dynamique :	28
1.5.1 Les équations d'Euler-Lagrange :	29
1.5.2 Intégration de la contrainte non holonomie dans le modèle dynamique ..	30
1.6 Propriétés du modèle dynamique :	32
1.7 Génération du mouvement :	33
1.7.1 Génération de mouvement entre deux points :	33
1.8 Commande des manipulateurs mobiles :	34
1.8.1 Commande PID d'un manipulateur mobile :	35
Conclusion :	38
Chapitre 3 : Coopération des manipulateurs mobiles	39
1.1 Introduction	39
1.2 Description de système et hypothèse	40

1.3	Le modèle dynamique du système	41
1.4	Loi de commande	43
1.5	Résultat de simulation.....	44
	Conclusion.....	46
	Conclusion général.....	47

Liste des figures

Figure 1. 1. Robot à structure ouverte simple [5].....	3
Figure 1. 2. Robot à chenilles [33].....	7
Figure 1. 3. Robot marcheur(ASIMO) [34].....	8
Figure 1. 4. Exemple d'un robot rampant [35].....	8
Figure 1. 5. Exemples de robots mobiles à roues(Thymio) [5].....	9
Figure 1. 6. Roue centrée et roue décentrée [20].....	10
Figure 1. 7. Roues omnidirectionnel [21].....	10
Figure 1. 8. Robot holonome KUKA youBot[21].....	11
Figure 1. 9. Equivalence modèle voiture et tricycle [21].....	12
Figure 1. 10. Modèle roues différentielles [21].....	13
Figure 1. 11. Système multi-robot [22].....	13
Figure 1. 12. Coopération de 2 PUMA 560 place sur des plateformes mobiles [23].	17
Figure 1. 13. Les approches méthodologiques pour faire coopérer dans les SMR [22]	18
Figure 1. 14. Tache coopérative de mobiles transport d'objets: (a).par un groupe de fourmis, (b).par un groupe de robots[23].....	19
Figure 2. 1. Illustration des paramètres de Denavit-Hartenberg[24].....	23
Figure 2. 2. Structure d'un robot à chaine cinématique direct [24].....	24
Figure 2. 3. Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier [5].....	25
Figure 2. 4. Schémas de modélisation de la plateforme mobile.....	26
Figure 2. 5. Manipulateur mobile ayant un bras de 2 ddl [36].....	28
Figure 2. 6. Schémas de génération de mouvement dans l'espace articulaire [25].....	33
Figure 2. 7. Schéma classique d'une commande PID [25].....	35
Figure 3. 1. Coopération de deux manipulateurs mobile [4].....	40
Figure 3. 2. Trajectoire de manipulateur mobile 2 générer par le manipulateur mobile 1..	44

Figure 3. 3. La coopération des deux manipulateurs mobiles.....	45
Figure 3. 4. Signal de manipulabilité.....	45

La liste des abréviations :

DH : Denavit Hatenberg.

MGD : Modèle géométrique direct.

MGI : Modèle géométrique inverse.

MCD : Modèle Cinématique direct.

MCI : Modèle Cinématique inverse.

MDD : Model différentiel direct.

OT : Organe terminal.

PID : Proportionnel int

Introduction générale

Introduction générale

Habituellement, les robots traditionnels sont limités sur les bras manipulateurs où les robots mobiles ayant un espace de travail limité. Le besoin des robots ayant une partie locomotrice a fait naître les manipulateurs mobiles [1]. Un manipulateur mobile est constitué principalement d'un ou plusieurs bras manipulateurs monté sur une base en mouvement ou un véhicule, ces systèmes associent les avantages des bras et la base mobile [2]. La plateforme mobile accroît l'espace de travail des bras, tandis que le bras offre de nombreuses fonctionnalités opérationnelles au véhicule [3]. Ces systèmes pourraient être utilisés dans l'exploitation sous-marine, la construction, l'exploration planétaire et militaire, les secours pendant les catastrophes, les bases nucléaires et l'urbanisme.

Les manipulateurs mobiles génèrent un grand potentiel pour réaliser des plusieurs tâches mais certaines tâches nécessitant la manipulation complexe qui deviennent très difficiles pour un seul manipulateur mobile, ce qui nécessitent l'intervention de multiples manipulateurs mobiles travaillant en coopération entre eux. Cependant, cette intervention provoque une certaine complexité structurale augmentée pour ces systèmes [4].

Les complexités structurales des manipulateurs mobiles ainsi que la coopération nous mènent aux problèmes suivants et qui seront étudié dans ce travail :

1. Quels sont les modèles cinématique et dynamiques des manipulateurs mobiles puisque le manipulateur mobile est subit au contraintes holonome et non-holonome ?
2. Comment pouvons-nous prévoir une trajectoire de mouvement adéquate pour un manipulateur mobile sous des contraintes holonome et non-holonome ?
3. Comment concevons-nous une commande adéquate puisque le manipulateur mobile doit agir dans défèrent environnements ?
4. Comment pouvons-nous coopérer plusieurs manipulateurs mobiles afin d'accomplir efficacement une tâche désirée ?

Pour mieux analyser ses problèmes, on utilise le modèle dynamique d'un manipulateur mobile ayant deux roues motrice et un bras de 2-ddl, ce travail est structuré comme suit :

- Le premier chapitre traite la terminologie des manipulateurs mobiles en expliquant la structure de chaque partie en détaille, la différence entre les systèmes holonome et les systèmes non holonome ainsi que les systèmes multi-robot puis la coopération et ces différents types.
- Le deuxième chapitre présente la modélisation cinématique et dynamique d'un manipulateur mobile. La cinématique directe et inverse, la méthode jacobéenne, les contraintes cinématiques sont brièvement discutées, les propriétés des systèmes dynamiques, génération de trajectoire et la commande utilisé.
- Quant au troisième chapitre on présente le contrôle coopératif en détaille et la discussions des résultats de la simulation.
- Une conclusion générale avec une synthèse des résultats obtenue, et proposant des perspectives pour une possibilité de continuer et améliorer ce travail.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Terminologie des manipulateurs mobiles

1.1 Introduction :

Un robot est un système polyvalent à commande automatique, reprogrammable. Il a été largement utilisé jusqu'à présent dans plusieurs applications industrielles. Depuis les dernières décennies, d'autres domaines d'application sont apparus : médical, service (spatial, sécurité civile), transport, sous-marin, divertissement, où le robot travaille soit de manière autonome, soit en coopération avec d'autres robots pour effectuer des tâches complexes dans un environnement plus ou moins structuré. On peut distinguer trois classes principales de robots : les manipulateurs robotisés, qui se imitent des bras humain, des robots marcheurs, qui imitent la locomotion de l'homme, des animaux ou les insectes et les robots mobiles, qui ressemblent à des voitures [5].

1.2 Constituants mécanique des robots manipulateurs :

Un robot manipulateur est un système mécanique constitué de $n+1$ corps, possédant deux corps particuliers la base l'organe terminal qui porte l'outil qui réalise les tâches et des actionneurs. Les corps sont liés entre eux par des *articulations*. Ces articulations sont soit prismatique P ou rotoïde R . Les corps et les liaisons du robot manipulateur sont numérotés de 0 à n dans un ordre croissant en partant de la base (Figure 1.1) [24].

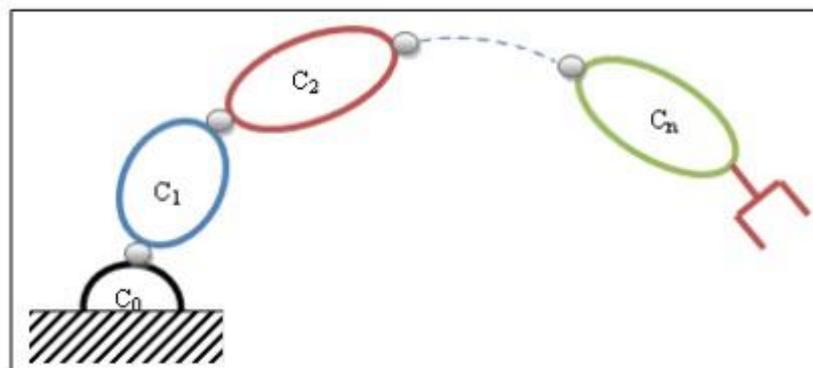


Figure 1. 1. Robot à structure ouverte simple [5].

1.2.1 Espace articulaire

L'espace dans lequel la position de tous les liens d'un robot sont représentés est appelé espace commun ou espace de configuration. Les coordonnées articulaires sont utilisées pour configurer cet espace. Sa dimension du robot lié au nombre d'articulations indépendantes qui est également le nombre de degrés de liberté de ce robot N . Donc on peut considérer qu'un robot à N degrés de liberté possède N articulations actionnées [24].

1.2.2 Espace opérationnel

L'emplacement, la position et l'orientation de l'effecteur terminal sont représentés dans l'espace de travail ou dans l'espace opérationnel. Nous pouvons considérer autant d'espaces de travail qu'il existe d'effecteurs finaux. En règle générale, les coordonnées cartésiennes sont utilisées pour spécifier la position dans \mathbb{R}^3 et la rotation dans $SO(3)$ pour l'orientation. Ainsi, l'espace de tâches est égal à $\mathbb{R}^3 \times SO(3)$. Un élément de l'espace de tâches est représenté par le vecteur $X \in \mathbb{R}^M$, où M est égal au nombre maximal de paramètres indépendants nécessaires pour spécifier l'emplacement de l'effecteur final dans l'espace. Par conséquent, $M < 6$ [24].

1.2.3 Redondance

Un robot est classé comme redondant lorsque le nombre de degrés du robot est supérieur au nombre de degrés de liberté de son espace opérationnel. Cette propriété augmente le volume de l'espace de travail effectif du robot et améliore ses performances. Notez qu'une chaîne ouverte simple est redondante si elle contient l'une des combinaisons de liaisons suivantes [24]:

- plus de six articulations.
- plus de trois articulations tournantes dont les axes se coupent en un point.
- plus de trois articulations tournantes d'axes parallèles.
- plus de trois articulations prismatiques.
- articulations prismatiques d'axes parallèles.
- articulations révolutives à axes colinéaires.

1.2.4 Configurations singulière

Les configurations singulières sont des positions particulières de l'organe terminal, pour lesquelles les robots se perdent leur rigidité infinie inhérente, et dans lesquelles l'effecteur final aura des degrés incontrôlables de liberté [5]. Par exemple, cela peut se produire lorsque :

- les axes de deux articulation prismatiques sont parallèles ;
- les axes de deux articulations rotoïde deviennent colinéaires ;
- l'origine de l'organe terminale se trouve sur une ligne qui coupe tous les axes des articulations.

1.3 Catégories des robots

La classification des robots est délicate selon leurs fonctionnalités et leurs potentialités. Les robots peuvent être classés en trois grandes catégories :

1.3.1 Les manipulateurs

Un manipulateur est un système mécanique articulée fixé à son environnement de travail destiné à exécuter des tâches itératives, structuré et son mouvement est répétitif et stocké dans une mémoire, dans le cas d'une fonction inattendu le manipulateur ne réagit pas, c'est pour ça ils sont appelé (automate). Les domaines d'application des manipulateurs sont : la peinture, le soudage par position, la manipulation des objets.

1.3.2 Les télémanipulateurs

Le télémanipulateur est un système mécanique poly-articulé et permette à l'homme de le commandé derrière un écran de protection pour des opérations effectuées en milieu hostile ou pour remplacer un handicap. Il existe deux modèles de Télémanipulateur : modèle multi-bloc avec des modules séparés de bras maître, bras esclave et le monobloc qui est constitué d'un seul manipulateur. Ce robot est muni d'une grande potentialité en le comparant aux robots évolués :

- meilleure opérabilité.
- capacités précises pour la réalisation des tâches.
- Amplification ou atténuation des mouvements.
- Le manipulateur esclave est autonome pour réduire la charge de travail à l'homme.

1.4 Les robots mobiles

1.4.1 Définition d'un robot mobile

Un robot mobile est robot capable de se déplacer dans un environnement précis. Ses plateformes ont grandes mobilité, un degré d'autonomie et une capacité de s'adapté et réagir dans l'environnement.

1.4.2 Classification des robots mobiles

Les robots mobiles sont classifiés selon leurs autonomies, le type de locomotion. Selon l'autonomie on peut classifier les robots mobiles en plusieurs catégories. Ces robots ont une capacité de prendre des décisions et de traitement de l'information qui réduit l'interaction humain. Parmi les classifications des robots on site :

- Véhicule télécommandé par un assistant ou par tache a réalisé
- Véhicule semi-autonome réalisant des tâches prédéfinies sans opérateur.
- Véhicule autonome qui réalise des tâches prés-définies.

1.5 Perception des robots mobiles

En robotique, la perception est un domaine essentiel, l'exécution de taches, ou la navigation dans un environnement inconnue est bâtie sur la perception. La perception est basée sur les capteurs qui traduisent les caractéristiques de l'environnement en informations.

Plusieurs capteur et outils utilisés pour la connaissance d'un environnement sont nombreux. Voici quelque moyen de perception :

- Les systèmes de vision en générales.
- Les télémètres laser et ultrasonores.
- Les capteurs optiques et infrarouges.
- Les capteurs tactiles et l'odométrie.

1.6 La structure des robots mobiles

Les robots mobiles sont composés de quatre parties essentielles :

- La structure mécanique.
- Le système de localisation.
- Les organes de sécurité.
- Le système de traitement des informations et gestion de tâches.

1.6.1 La structure mécanique

Il existe quatre types de structures mécaniques des robots mobiles selon la capacité de mouvement :

1.6.1.1 Les robots à chenilles :

Les robots à chenilles ont une grande stabilité mécanique avec un grand contact avec le sol ce qui les permettent d'avoir une bonne adhérence, ils permettent également la possibilité de se déplacer dans des environnements délicat et de franchir les obstacles [38]. .



Figure 1. 2. Robot à chenilles [33].

1.6.1.2 Les robots marcheurs :

Les robots marcheurs sont des robots ayant une locomotion fondée des pattes inspirées des hommes, des insectes et les animaux. Ils ont destiné à accomplir des taches à accès difficile, leur stabilité dépend de nombre de patte utilisé [6].



Figure 1. 3. Robot marcheur (ASIMO) [34].

1.6.1.3 Les robots rampants.

La reptation est une solution de locomotion pour un environnement de type tunnel qui conduit à réaliser des structures filiformes. Le système est composé d'un ensemble de modules ayant chacun plusieurs mobilités. Les techniques utilisées découlent des méthodes de locomotion des animaux [38].



Figure 1. 4. Exemple d'un robot rampant [35].

1.6.1.4 Les robots mobiles à roues :

Les robots mobiles à roue sont les robots à base actionnée par des roues, ils peuvent répondre de façon unique en raison de leur capacité à travailler dans de vastes domaines (potentiellement non structurés et dangereux). Les robots mobiles ont des modèles mathématiques assez simples pour décrire leurs capacités de mouvement instantané,

Les robots mobiles à roue sont de plus présents dans la robotique industrielle et de service, en particulier lorsque des capacités de mouvement flexibles sont requises sur des terrains relativement lisses et des surfaces. Donc catégorie des roues choisie influe sur le mouvement global du robot, trois familles de roues qu'on peut trouver dans la robotique mobile [6] :



Figure 1. 5. Exemples de robots mobiles à roues(Thymio) [5].

1.6.2 Types des roues :

Les différents types de roues que l'on rencontre sont :

- Roue fixe se déplace dans une sens de direction médiane, elle ne peut pas tourner vers d'autre sens.
- Roue centrée orientable possède une orientation et une rotation, ce qui la permet de se déplacer sur deux sens.
- Roue folle est le cas par exemple des roues des chaises de bureau, elle peut se déplacer dans tous les directions.

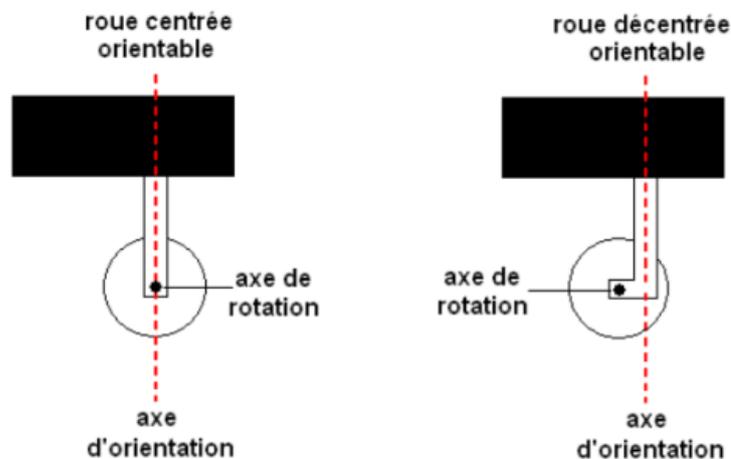


Figure 1. 6. Roue centrée et roue décentrée [20].

En développant ces roues, d'autres roues plus performantes ont été apparue comme la roue suédoise (Figure1.7). Cependant, elles ne sont command ables que dans certaines directions. Dans cette catégorie nous trouverons notamment :

1.6.2.1 Les roues omnidirectionnelles :

Une roue omnidirectionnelle est une roue typique augmentée par des rouleaux sur sa circonférence extérieure. Ces rouleaux tournent librement autour des axes dans le plan de la roue et tangentiellement à la circonférence extérieure de la roue, et ils permettent le glissement latéral pendant que la roue avance ou recule sans glisser dans cette direction [21]



Figure 1. 7. Roues omnidirectionnel [21].

1.6.3 Les contraintes des robots mobiles :

Tout robots à roues est soumis à des contraintes cinématiques qui réduisent en général sa mobilité locale, tout en laissant intacte la possibilité d'atteindre des configurations arbitraires par des manœuvres appropriées. Selon cet assemblage on peut distinguer deux types de robot mobile les robots holonome et les robots non holonome

1.6.3.1 Les robots holonome :

Sont des robots qui ont capable de se déplacer dans tous les directions c'est-à-dire ils ont à chaque instant de se déplacer dans n'importe quelle direction du plan, sans avoir à effectuer une reconfiguration de ses roues, en respectant la perpendicularité par rapport à l'axe de la direction précédente (comme chaise à roues) [21].

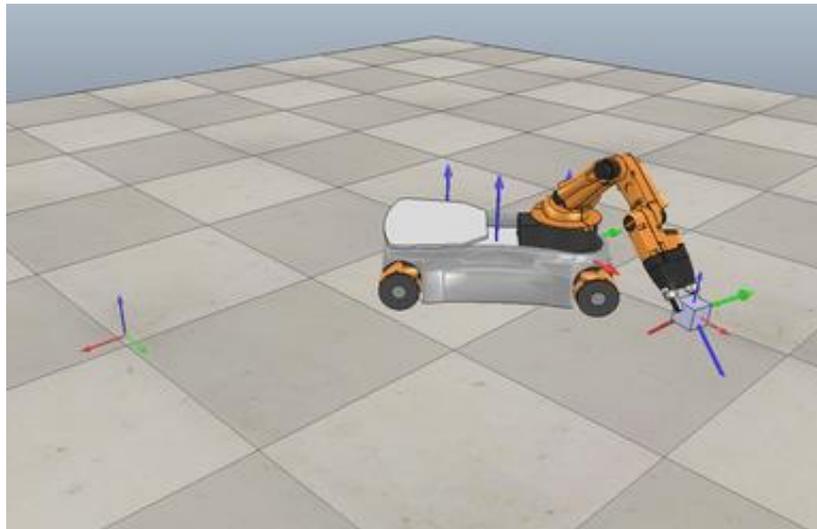


Figure 1. 8. Robot holonome KUKA youBot[21].

1.6.3.2 Les robots non-holonome :

Ces des robots possèdent un nombre de degrés de mobilité inférieur au nombre de degrés de liberté du robot mobile. La contrainte non holonomie indique que le robot ne peut se déplacer que dans la direction normale de l'axe de mouvement des roues. Le robot mobile ne peut pas se déplacer dans la direction latérale. Il se déplace soit en avant soit en arrière ou il tourne sur lui-même [21].

1.6.3.2.1 Classification des robots mobile non holonome

Les configurations non-holonomes les plus courantes sont :

Le tricycle / la voiture : ces deux structures sont constituées d'un axe fixe et d'un axe d'entraînement (Figure 1.9). Dans le cas du tricycle, seule une roue est présente sur l'axe directeur, contrairement à la voiture qui en possède deux. Elle est soumise à la contrainte non holonomie par la méthode d'Ackermann. Notamment les axes de rotation des 4 roues doivent s'intersecter en un point unique ; le Centre Instantané de Rotation. Pour cela, la vitesse de la roue extérieure doit être légèrement supérieure à celle de la roue intérieure. La structure de type voiture peut être modélisée par une structure équivalente à celle de 3 roues, ce qui revient au modèle du tricycle [38].

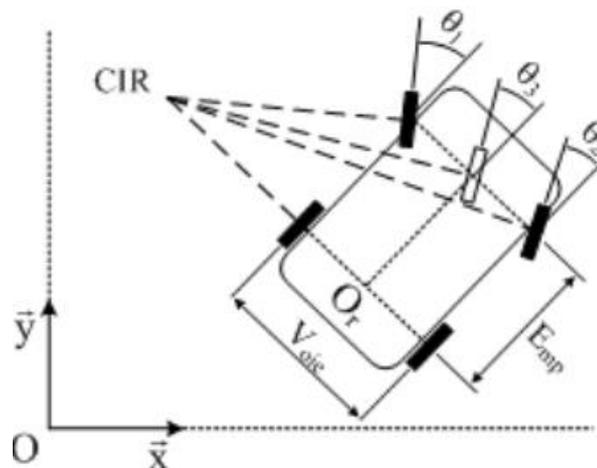


Figure 1. 9. Equivalence modèle voiture et tricycle [21].

Les roues différentielles (Figure 1.10) : cette structure également classique est constituée de deux roues motrices placées sur le même axe. Cette structure permet au véhicule de tourner sur place. Ainsi le robot peut pivoter rapidement, ce qui donne des capacités de déplacement intéressantes. Le travail qui suit dans les chapitres suivants se fait à base de cette structure [38].

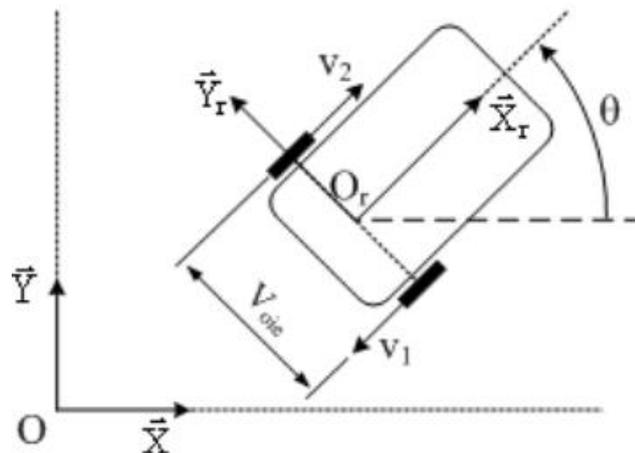


Figure 1. 10. Modèle roues différentielles [21].

1.7 Les systèmes multi robot

Un système multi-robot est un groupe de robots, de mêmes types ou de catégories différentes, travaillant dans le même environnement et ayant la capacité d'interagir avec leur environnement externe. Les robots doivent partager et/ou agir sur des tâches communes. Ainsi que la mise en place d'un contrôle individuel pour chaque robot, Les robots multiples utilisent des stratégies de contrôle adéquate pour obtenir des organise robotique cohérentes et efficaces pour effectuer les tâches requises [22,23].

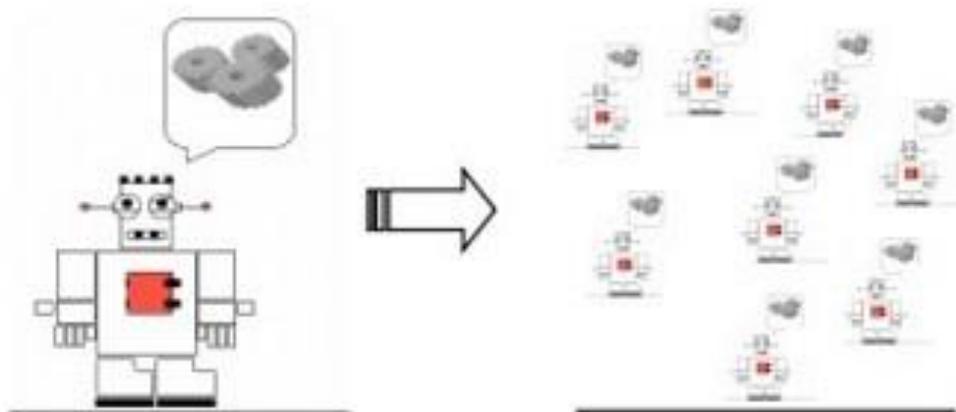


Figure 1. 11. Système multi-robot [22].

1.7.1 Les types des systèmes multi-robots :

1.7.1.1 Système multi-robots homogènes :

Les robots homogènes sont l'ensemble de robots qui ont les mêmes particularités (de même types), ils s'organisent pour soulever, transporter, pousser et déposer l'objet qu'un seul robot ne peut pas le faire.

1.7.1.2 Systèmes multi-robots hétérogènes :

Un robot hétérogènes est un ensemble de robots mixtes, ce qui veut dire ne sont pas de même types, il peut y avoir par exemple un système multi-robots composé des robots fixes et des robots mobiles.

1.8 Motivations pour les systèmes multi-robots coopératifs :

Pour la robotique, le fait d'utiliser une équipe des robots, peut avoir un effet sur les capacités offertes par les systèmes robotisés. Le regroupement de robots au sein d'un même système est aujourd'hui possible et d'un poids majeur dans la robotique. On peut comparer une équipe de robots à certains regroupements d'individus ayant un but fonctionnel commun, par exemple des membres d'une équipe de travail étant en mesure de se collaborer et de coopérer. Plus spécifiquement, la coopération au sein de systèmes multi-robot est motivé par deux facteurs principaux : la tâche a besoin d'une coopération d'un nombre minimal de robots, ou afin d'apporter les avantages suivants [22, 23] :

➤ **Tolérance aux fautes :**

Pour un groupe de robots qui travaille ensemble, leur production continue dans le cas où l'un de ces robots est en défaillance.

➤ **Meilleure efficacité et/ou performance :**

Un groupe de robots peut offrir un plus en termes d'e rendement et de performance à générer. En profitant de la division parallèle des missions à exécuté. Par exemple : l'utilisation d'un groupe de robots pour déplacer un objet, permet de diviser cette force sur les différents robots [22,23].

➤ **La complexité de la tâche :**

Certaines tâches sont plus complexes pour un robot ce qui oblige une coopération afin de la réaliser.

➤ **Réduction de coût :**

Bien que ce point ne soit pas toujours vrai, il est possible de développer un groupe de robots simples à un coût inférieur comparativement à un seul robot beaucoup plus complexe, et coûteux afin d'effectuer le même ensemble de tâches [37].

➤ **Flexibilité :**

La flexibilité veut dire que la tâche peut être exécutée de plusieurs manières.

➤ **Emergence :**

L'utilisation des systèmes multi-robots offre plusieurs avantages, cependant cela entraîne l'apparition des aspects liés à l'interaction entre les différents membres du groupe : la coopération, la coordination, la communication et rend la commande du système pour réaliser une mission plus complexe. [23]

Produire une opportunité supérieure à celle de la somme des unités. L'utilisation de multiples robots offre plusieurs avantages, mais cela conduit à l'apparition d'aspects liés à l'interaction entre les différents membres du groupe pour réaliser une tâche plus complexe.

1.9 L'interaction dans les SMR

Une interaction est une connexion dynamique entre au moins deux robots à travers un ensemble d'actes réciproques. C'est grâce à la coopération que les robots puissent accomplir leurs missions. La génération des interactions consiste à élaborer des mécanismes qui permettent aux robots d'interagir, d'analyser et de concevoir les différentes formes d'interactions que les robots peuvent avoir pour accomplir leurs missions [37].

1.9.1 Types d'interaction

Les formes d'interaction sont la répartition de travail entre plusieurs robots et la coordination.

1.9.1.1 Coordination

La coordination permet aux robots de réaliser une seule fois toutes les tâches. Et que les solutions des problèmes sont utiles pour les autres robots. Ce qui fait ces travaux doivent être temporellement coordonné [37].

1.9.1.2 Coopération

La coopération détermine « qui fait quoi, quand, ou, avec quels moyens, de quelle manière et avec qui », ce qui veut dire, à résoudre les différents sous problèmes, donc elle est la forme générale d'interaction des robots multiples [37].

1.10 Coopération

1.10.1 Les tâches coopératives :

La tâche coopérative est considérée comme l'objectif à atteindre par plusieurs robots. Pour qu'une tâche soit qualifiée, les robots doivent soit partager des objectifs communs [GM02], soit décomposer la tâche finale en un ensemble de tâches connexes. Ensuite, ces liens sont à leur tour décomposés en sous-tâches. Cette division se poursuit jusqu'à ce que les sous-tâches élémentaires soient atteintes. Une sous-tâche est dite élémentaire si elle est directement réalisable par un robot seul, et dès que les sous-tâches sont distribuées, le robot qui travaille sur une de ces tâches élémentaires doit coopérer avec au moins un autre robot effectuant une autre sous-tâche [37].



Figure 1. 12. Coopération de 2 PUMA 560 place sur des plateformes mobiles [23].

1.10.2 Type de coopération

Dans les multiples robots, on peut distinguer deux types de coopérations : la coopération émergente et la coopération intentionnelle.

1.10.2.1 La coopération émergente

Cette approche s'inspire des observations de sociétés biologiques en particulier les fourmis, les abeilles et les oiseaux pour développer des comportements similaires dans les équipes de robots. Elle a couramment été appliquée à des groupes de robots homogènes. Ce type est explicite par les interactions locales des robots selon des règles simple, cette approche permet au robot de s'adapté à la situation imprévue et le changement de condition. Mais cette approche demande un nombre important des robots pour qu'ait lieu ce qui rend l'identification des comportements individuels des robots difficile à réaliser [37].

1.10.2.2 La coopération intentionnelle

Ce type est un mécanisme de coopération qui implique que les robots coopèrent par le biais d'échanges d'informations et de négociations directement liées à la tâche à accomplir. Ce type de coopération nécessite donc une communication explicite. Elle permet de mieux exploiter les capacités d'équipes de robots hétérogènes en l'exploitant pour accomplir des actions complémentaires directement liées à la tâche à réaliser. Ces actions sont obtenues en décomposant la tâche correspondante. Cette démarche descendante est plus simple à mettre en œuvre que la démarche ascendante de la coopération émergente [37].

1.10.3 Mécanisme de coopération

La façon dont une mission est décomposée en tâches, l'ordre d'exécution de ces tâches et le niveau de synchronisation des actions des robots pendant l'exécution des sous-tâches élémentaires qui représentent ensemble la logique du mécanisme de coopération. Parmi les protocoles de communication qui existent on trouve le protocole de réseau contractuel (en anglais : Contract-Net Protocol - CNP), inventé par Smith qui est le plus utilisé. Le CNP est largement mise en œuvre dans la robotique grâce au compromis entre la répartition des charges sur les robots et la d'excision centralisée. Les mécanismes de coopération décompose en: approche biologique, approche informatique et approche automatique [37].

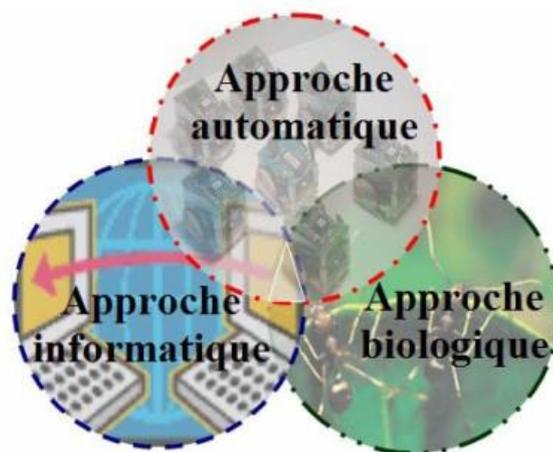


Figure 1. 13. Les approches méthodologiques pour faire coopérer dans les SMR [22].

1.10.4 Approche des sciences vivantes

Cette approche est inspirée des organisations, des règles de contrôle et du comportement des sociétés biologiques, tel que les insectes les oiseaux les animaux pour les projeté sur un groupe de robots coopératifs, prenant exemple de la récolte de pollen chez les abeilles, Cette dernière consiste à rechercher du pollen dans les champs et les forêts et `à la transporter par la suite à la ruche, elle était une des sources d'inspiration pour une coopération des robots, et cela en remplaçant les abeilles par les robots, le pollen par des objets dans l'environnement, les phéromones par des communications entre les robots et la ruche par une position dans l'environnement. Cette approche est exploitable que par les robots homogènes [37].

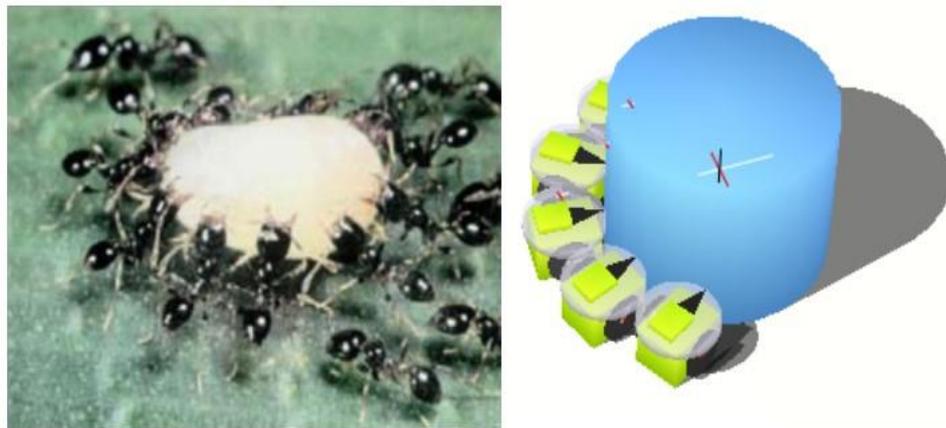


Figure 1. 14. Tache coopérative de mobiles transport d'objets: (a).par un groupe de fourmis, (b).par un groupe de robots[23].

1.10.5 Approche automatique :

1.10.6 Robotique collective

La coopération entre un ensemble de systèmes automatisés est similaire à la présence de modèles de contrôle de systèmes multi-robots. C'est ce qui est appliqué dans le cadre de la coopération, où chaque robot est modélisé pour qu'il fasse partie du modèle global du système

1.10.7 Les critères de performance du système

La répartition des sous tâches élémentaires entre des robots doit être réalisée de manière à ce que le système soit le plus performant possible pour effectuer une tâche. La performance du système peut être mesurée en se basant sur différents caractéristiques [22,23].

1.10.7.1 Temps d'exécution de la mission :

C'est le temps nécessaire pour effectuer la tâche demandée. Le temps d'exécution devrait s'améliorer de façon proportionnelle au nombre de robots grâce au partage des tâches. Il y a des limitations concernant le nombre des robots utilisé pour effectuer une mission, ou l'ajout des robots mobiles n'améliore pas toujours le temps d'exécution.

1.10.7.2 Stabilité et fiabilité :

Une architecture de contrôle stable signifie qu'elle assure aux robots d'atteindre la consigne désiré et alors d'accomplir sa tâche. Sans dès que la fiabilité du système est représentée par sa capacité à finir la mission avec la défaillance d'une entité robotique ou d'une partie de l'entité robotique [37].

1.10.7.3 Complexité du calcul et de la communication nécessaire :

La complexité du calcul des entités, est considéré comme une clé pour une réaction en temps réel. Actuellement et grâce à la technologie très avancée, les machines sont caractérisées par des capacités de calcul puissantes et des différents moyens de communication. Malgré ces capacité remarquable, la gestion d'un grand nombre de robots mobiles qui communiquent entre eux afin d'effectuer une tâche ou déplacer vers un endroit devrait être très complexe. Si le critère de la complexité n'était pas pris en considération et que le temps du calcul et de la communication est couteux, alors les performances du système seront diminuées [37].

1.10.7.4 Flexibilité :

C'est la capacité d'ajout de nouvelle entité, lors de la réalisation des tâches. Le système a besoin d'étudier l'influence des nouveaux robots sur les éléments déjà opérationnels.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les définitions reliées aux bras manipulateur et les robots mobiles destinés à la modélisation des manipulateurs mobiles et les différentes contraintes soumis sur de tel système. Et aussi les problèmes des systèmes multi-robots, les approches proposées pour faire coopérer et communiquer un ensemble de robots, les communications possibles dans un système multi-robots.

On rencontrera fréquemment ces termes dans les chapitres suivants et certains d'entre eux seront reformulés de manière plus analytique et mathématique. ce travail est focalisé sur la coopération de deux manipulateur-mobile dans un but précis, donc on sera face à des problèmes de navigation d'un seul robot, qui est l'unité fondamentale d'un système multi-robot.

Chapitre 2

Chapitre 2 : Modélisation des manipulateurs mobiles

2.1 Introduction :

La modélisation des robots se fait en deux parties essentielles (la cinématique et la dynamique) afin d'obtenir un modèle ou un prototype du robot sans sa réalisation. La partie cinématique est le rapport entre les vitesses linéaires et angulaires de l'organe terminal et l'espace articulaire. Tandis que la dynamique concerne la relation entre les forces qui agissent sur eux et les positions, ainsi que les vitesses et les accélérations qu'ils produisent. La modélisation du manipulateur mobile sera décomposée en deux parties : le bras manipulateur et la base mobile, à la fin de ce chapitre un modèle mathématique sera présenté afin d'appliquer la commande. Ou sera présenté en vue d'application d'une commande.

2.2 Modélisation du bras manipulateur :

Comme, la coopération sera réalisée par deux manipulateurs mobiles identiques, donc la modélisation suivante sera pour un seul manipulateur.

2.2.1 Modèle géométrique :

La modélisation adéquate des robots exige des méthodes cohérentes (Denavit, Sheth, Renaud, Khalil, Borrel) pour spécifier les coordonnées opérationnelles de l'organe terminal en fonction des coordonnées généralisées. Parmi les méthodes les plus répandues, on trouve celle de *Denavit-Hartenberg*.

Dans cette convention, chaque transformation homogène ${}^{i-1}T_i$ est représentée comme un produit de quatre transformations de base :

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(x, \alpha_i) \text{Trans}(x, d_i) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(z, a_i) \quad (2.1)$$

Où les quatre grandeurs θ_i , α_i , d_i , a_i sont des paramètres associés au corps i et l'articulation i . Les quatre paramètres a_i , α_i , d_i , et θ_i dans (2.1) sont généralement donnés les noms : longueur du corps, torsion du corps, décalage du corps et angle de l'articulation, respectivement. Ces noms dérivent d'aspects spécifiques de la relation géométrique entre deux repères [19].

Avant de calculer le modèle géométrique on doit d'abord considérer que :

- Les corps du robot sont supposés rigides.
- Aucun jeu mécanique ou élasticité des articulations.
- L'axe x_i doit toujours être perpendiculaire sur axes z_{i-1}

La matrice de passage qui repère R_i dans R_{i-1} est :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & d_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

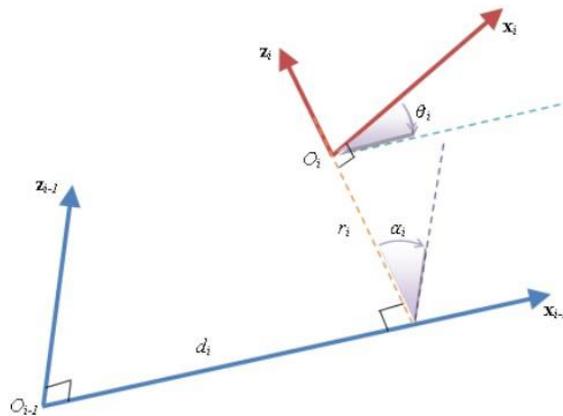


Figure 2. 1. Illustration des paramètres de Denavit-Hartenberg[24].

Sachant que le manipulateur est un système à configuration simple composé de $n + 1$ corps de C_0 à C_n et de n articulations. Le corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_n le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation i connecte le corps C_{i+1} au corps C_i [24].

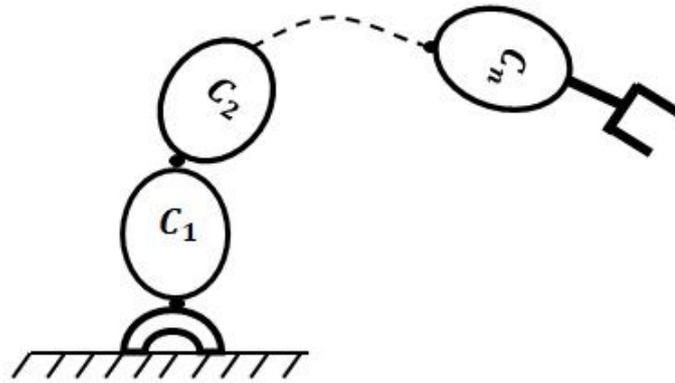


Figure 2. 2. Structure d'un robot à chaîne cinématique direct [24].

2.2.1.1 Modèle géométrique direct :

Le **MGD** représente l'ensemble des relations qui permettent de décrire la situation de l'organe terminal du robot par rapport à la base en fonction de ses coordonnées articulaires. Pour un robot série le **MGD** est défini par la matrice de transformation 0_nT [25]:

$${}^0_nT = {}^0_1T(q_1) \cdot {}^1_2T(q_2) \cdot {}^2_3T(q_3) \dots {}^{n-1}_nT(q_n)$$

Le MGD peut aussi être représenté par la relation :

$$\mathbf{X} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (2.2)$$

Où \mathbf{q} est le vecteur des variables articulaires tels que :

$$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_n]^T$$

2.2.1.2 Modèle géométrique inverse :

Contrairement au MGD qui permet la représentation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaire, MGI permet la détermination des coordonnées articulaires en fonction de la position de l'organe terminal. Pour qu'on y fasse, trois méthodes de calcul de sont les plus répandues [5] :

- 1) La méthode de Paul, qui s'applique pour la plupart des robots industriels.
- 2) La méthode de Peiper, pour les robots de 6 ddl avec trois articulations rotoïde et les trois autres articulations prismatiques.
- 3) La méthode de Raghavan et Roth, qui consiste à résoudre le problème des robots à 6 ddl par un polynôme de degré au plus ou égale à 6.

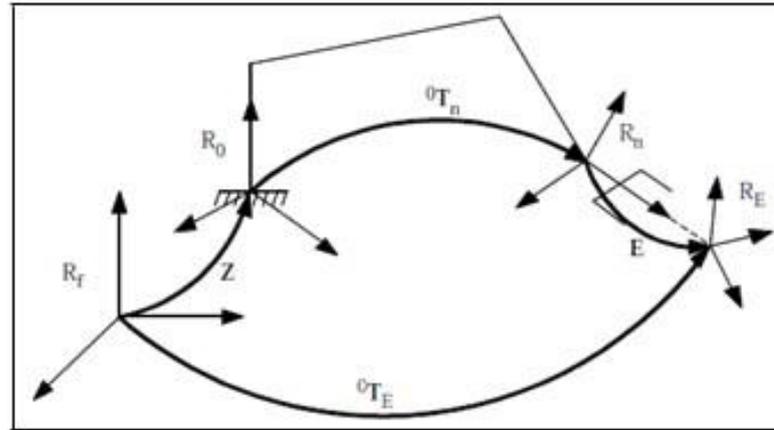


Figure 2. 3. Transformations entre l’organe terminal et le repère atelier [5].

2.3 Modèle cinématique :

2.3.1 Modèle cinématique direct

MCD définit une fonction de vitesse entre des positions et orientations cartésiennes et la vitesse des positions articulaires (2.3). Les relations de vitesse sont alors déterminées par le Jacobéen $J(q)$ de ce qui est une forme vectorielle de la dérivé des positions articulaires plusieurs méthode ont était faite pour calculé la matrice jacobéenne [19].

$$\dot{X} = J(q) \dot{q} \tag{2. 3}$$

Où, $J(q)$ est de dimension $(m \times n)$ du mécanisme, égale à $\frac{\partial x}{\partial q}$.

$X = f(q)$, À partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

Où, J_{ij} est l’élément (i, j) de la matrice Jacobéenne J .

2.4 Modélisation de la plate-forme mobile :

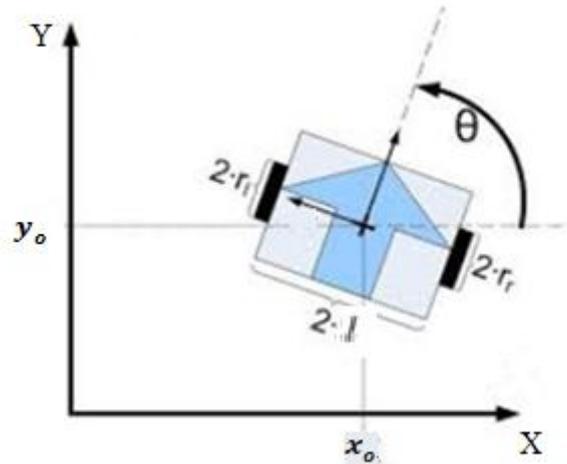


Figure 2. 4. Schémas de modélisation de la plateforme mobile

La base mobile utiliser est un robot mobile à deux roues motrices (robot à roues différentielles, Figure 2.4), Le mouvement et l'orientation sont réalisés par les actionneurs indépendants. Le robot est soumis à la contrainte non-holonomie qui est décrit dans (2.4), on peut dire que le robot satisfaire la condition suivante [4] :

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (2.4)$$

Où $A(q) \in \mathbb{R}^{n_v \times n}$ est la matrice liée à la contrainte.

Généralement, la base mobile soumettre au contrainte non holonomie

$$\dot{y}_o \cos \theta - \dot{x}_o \sin \theta = 0 \quad (2.5)$$

Avec

$$\dot{x}_o = v \cos \theta \text{ et } \dot{y}_o = v \sin \theta$$

Où (x_o, y_o) sont le centre des roues et θ et l'angle d'orientation de la plateforme. Cette contrainte n'est pas intégrable. L'espace de configuration du système est tridimensionnel, alors que l'espace de vitesse est bidimensionnel. Cette contrainte devient

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_o \cos \theta + \dot{y}_o \sin \theta + l\dot{\theta} &= r\dot{\theta}_r \\ \dot{x}_o \cos \theta + \dot{y}_o \sin \theta + l\dot{\theta} &= r\dot{\theta}_l \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Où θ_r et θ_l sont les positions angulaires des deux roues motrices, respectivement, et de $2l$ est la largeur de plate-forme. Laisser les coordonnées généralisées de la plate-forme mobile être $q = (x_o, y_o, \theta, \theta_r, \theta_l)$ donc les trois contraintes sont regroupés dans $A(q)$ tel que

$$A(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & l & -r & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -l & 0 & r \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Afin d'éliminer la force de contrainte,

$$S^T(q)A^T(q) = 0 \quad (2.8)$$

Nous pouvons trouver le vecteur d'entrée de vitesse $v = [\dot{\theta}_r \dot{\theta}_l]^T$

Pour tous :

$$\dot{q} = S(q) \cdot v \quad (2.9)$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Prenant que : $2l\dot{\theta} = r(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)$ si on intègre cette équation et en éliminant les conditions initial $\theta(0) = \theta_r(0) = \theta_l(0)$, on aura :

$$\theta = \frac{r}{2l}(\theta_r - \theta_l) \quad (2.11)$$

Donc les 2 contraintes non-holonomie s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_o \sin \theta - \dot{y}_o \cos \theta &= 0 \\ \dot{x}_o \sin \theta - \dot{y}_o \cos \theta &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

A partir de ces équations on peut écrire sous forme matricielle la contrainte non-holonomie comme suit : $A(q)\dot{q} = 0$ Où, on choisie $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T = [x_o \ y_o \ \theta_r \ \theta_l]^T$ et A est donné comme :

$$A(q) = \begin{bmatrix} -\cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & -\cos \theta & \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

En fin la cinématique de ce mécanisme est:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \dot{y}_o \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2l}(1 \cos\theta - d \sin\theta) & \frac{r}{2}(1 \cos\theta + d \sin\theta) \\ \frac{r}{2}(1 \sin\theta + d \cos\theta) & \frac{r}{2}(1 \sin\theta - d \cos\theta) \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.5 Modèle dynamique :

La dynamique d'un manipulateur mobile représenté dans la figure (3) peut être obtenue par deux formulations différentes : soit par la formulation de Lagrange Euler et formulation récursive de Newton Euler, la formulation de Lagrange-Euler traite le manipulateur mobile dans son ensemble et exécute l'analyse utilisant la fonction de Lagrange (la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système) [4].

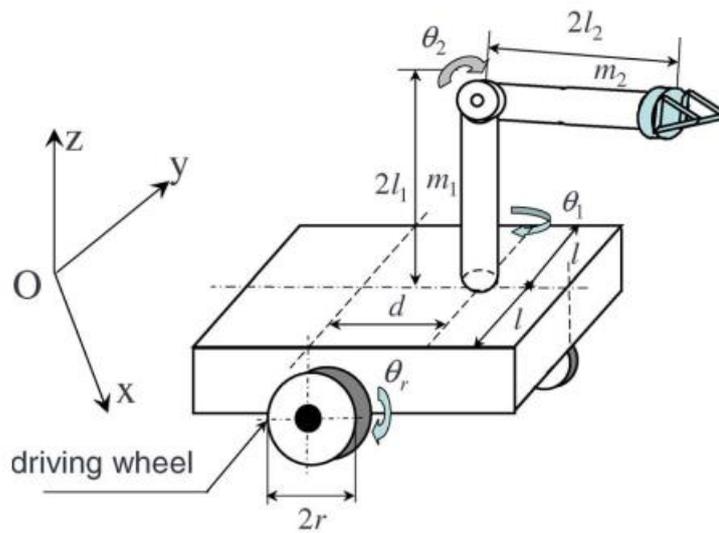


Figure 2. 5. Manipulateur mobile ayant un bras de 2 ddl [36].

Dans la suite de ce chapitre, on prolonge plus loin la dérivation de la dynamique pour les manipulateurs mobiles.

2.5.1 Les équations d'Euler-Lagrange :

Ces équations décrivent les équations des mouvements en termes de travail et d'énergie du système, Lagrangienne est défini comme différence entre toute l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de total $L = E - U$. S'écrit comme :

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.15)$$

En Suivant la méthode d'Euler-Lagrange, on aura la forme suivante :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \quad (2.16)$$

Où : $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ La matrice d'inertie, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ La matrice centrifuge et Coriolis. $\mathbf{G}(\mathbf{q})$: Vecteur de gravité. $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_n^T \ \mathbf{f}_h^T] = [(\mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda})^T \ 0]$: Vecteur de perturbation de forces imposé par le robot sur l'environnement et $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_n \ \lambda_h]$ représente les constante de Lagrange qui définit respectivement les contraintes non-holonome est les contraintes holonome. $\boldsymbol{\tau}$: Vecteur des couples des actionneurs des articulations, qui est les entrées pour commander ce robot. $\mathbf{B}(\mathbf{q})$: Matrice dû à la transformation géométrique généralement une matrice d'identité, $\ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}$ sont respectivement les l'accélération, la vitesse et la position des coordonner généralisées. Les équations dynamiques du manipulateur mobile décrivant le cas d'un manipulateur à 2-ddl monté sur la plate-forme mobile à entraînement différentiel non-holonomie, est calculé en détail dans l'annexe A.

Où :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_{ba} \\ \mathbf{M}_{ab} & \mathbf{M}_a \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b & \mathbf{C}_{ba} \\ \mathbf{C}_{ab} & \mathbf{C}_a \end{bmatrix}, \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_b \\ \mathbf{G}_a \end{bmatrix}, \mathbf{B}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_a \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_b \\ \boldsymbol{\tau}_a \end{bmatrix}$$

Sachant que $\mathbf{M}_b, \mathbf{M}_a$ décrivent l'inertie de la base mobile et le manipulateur, $\mathbf{M}_{ba}, \mathbf{M}_{ab}$ décrivent le couplage de l'inertie entre la plateforme et le manipulateur ; $\mathbf{C}_b, \mathbf{C}_a$ sont les force centrifuge et les couple de Coriolis de la base mobile et le manipulateur, $\mathbf{C}_b, \mathbf{C}_a$ sont également le couplage des forces centrifuges et les couples de Coriolis entre la plateforme et le bras ; $\mathbf{G}_b, \mathbf{G}_a$ représentent la force gravitationnel de la base mobile ainsi que le manipulateur, $\mathbf{B}_b, \mathbf{B}_a$ sont les configurations géométrique du base de la plateforme et bras, $\boldsymbol{\tau}_b, \boldsymbol{\tau}_a$ les entrée de commande de la base mobile et le robot manipulateur.

2.5.2 Intégration de la contrainte non holonome dans le modèle dynamique :

Prenant les coordonnées généralisées du système $\mathbf{q} = [q_b \ q_a]$ tel que q_b représente-les coordonnées généralisées de plateforme mobile et q_a représente-les coordonnées généralisées du bras manipulateur, Les coordonnées de la base mobile sont [4]:

$$\mathbf{q}_b = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$

Où x, y sont les coordonnées du centre de la base et θ et l'angle d'orientation de la plateforme. Selon des prétentions faites pour les roues, la base mobile se déplace seulement à la perpendiculaire de direction à l'axe des roues d'entraînement qui signifie le roulement pur et le mouvement non glissant de la base mobile. Ces roues ne peuvent pas glisser ou se déplacer latéralement de l'axe des roues. Par conséquent, la contrainte cinématique non holonome pour le mi point de l'axe des roues peut être exprimée dans l'équation (2.17), et sous la forme matricielle dans l'équation (2.18).

$$\dot{y}_o \cos \theta - \dot{x}_o \sin \theta = 0 \quad (2.17)$$

Et
$$\mathbf{A}(\mathbf{q}_b)\dot{\mathbf{q}}_b = \mathbf{0} \quad (2.18)$$

Supposant qu'il y a l nombres de non-intégrable et indépendantes les uns des autres. La plate-forme mobile est complètement non holonome et on peut écrire la matrice $\mathbf{A}(\mathbf{q}_b)\dot{\mathbf{q}}_b$ d'équation (2.19).

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}_b) = [\mathbf{A}_1^T(\mathbf{q}_b) \quad \mathbf{A}_2^T(\mathbf{q}_b) \quad \dots \quad \mathbf{A}_l^T(\mathbf{q}_b)]^T \quad (2.19)$$

Les forces généralisées des contrainte non holonome peuvent être données par l'équation (2.20).

$$\mathbf{f}_n = (\mathbf{A}^T(\mathbf{q}_b)\boldsymbol{\lambda}_n) \quad (2.20)$$

$\mathbf{H}(\mathbf{q}_b)$ Est une matrice de rang m formée par un ensemble de vecteurs lisses et linéairement indépendants couvrant l'espace nul de la matrice $\mathbf{A}(\mathbf{q}_b)$ ce qui veut dire :

$$\mathbf{H}^T(\mathbf{q}_b)\mathbf{A}^T(\mathbf{q}_b) = \mathbf{0} \quad (2.21)$$

Où
$$\mathbf{H}(\mathbf{q}_b) = [\mathbf{H}_1(\mathbf{q}_b) \quad \mathbf{H}_2(\mathbf{q}_b) \quad \dots \quad \mathbf{H}_{n_b-l}(\mathbf{q}_b)]$$

Selon les équations (2.18) et (2.21), le modèle cinématique de vitesse du premier ordre d'une plate-forme mobile non holonome, également appelée système de direction, peut être écrit sous la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{q}}_b = \mathbf{H}(\mathbf{q}_b)\boldsymbol{\alpha} \quad (2.22)$$

Où $\boldsymbol{\alpha}$ est appelée vitesse de direction du système cinématique, elle peut s'écrire soit en fonction de la vitesse linéaire et la vitesse angulaire comme la représente dans l'équation (2.23) ou en fonction des vitesses des roues exprimé en équation (2.24).

$$\boldsymbol{\alpha} = (\boldsymbol{\vartheta} \quad \boldsymbol{\omega}) \quad (2.23)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = (\dot{\boldsymbol{\theta}}_r \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_l) \quad (2.24)$$

Réécrire l'équation (2.18) sous la forme matricielle, en termes de vitesses linéaires et angulaires de la plate-forme mobile sur roues et en termes de vitesses des roues droite et gauche.

$$\dot{\mathbf{q}}_b = \begin{bmatrix} \cos \theta & \mathbf{0} \\ \sin \theta & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\vartheta} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_b = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_r \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_l \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Où r est le rayon des roues et $2l$ est la distance des deux roues de la plate-forme mobile.

Soit $\dot{\boldsymbol{\zeta}} = [\boldsymbol{\alpha}^T \quad \dot{\mathbf{q}}_a^T]$ En raison de la contrainte non holonomie définie dans l'équation (2.18) et l'équation (2.22), il existe un vecteur $\boldsymbol{\zeta}$, tel que

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} \quad (2.27)$$

En la dérivant, on aura :

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\boldsymbol{\zeta}} + \dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} \quad (2.28)$$

Intégrant les contraintes non holonome et ses dérivées données par les équations (2.27) et (2.28) dans la dynamique du manipulateur mobile, le modèle dynamique sera exprimée dans (2.29).

$$\mathbf{M}_1(\mathbf{q})\ddot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{C}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{B}_1(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \quad (2.29)$$

Avec

$$\begin{cases} M_1(q) = H^T(q)M(q)H(q). \\ C_1(q, \dot{q}) = H(q)[M(q)\dot{H}(q) + C(\dot{q}, q)H(q)] \\ G_1(q) = H^T(q)G(q) \\ B_1(q) = H^T(q)B(q) \end{cases}$$

2.6 Propriétés du modèle dynamique :

Voici quelques propriétés pour la dynamique des manipulateurs mobiles, qui sont convenable pour la conception de contrôleur :

- La matrice d'inertie $M(q)$ est symétrie et définie positif.
- $M(q)$ est réversible donc, il existe une matrice inverse $M^{-1}(q)$ qui est également défini positif.
- La force de centrifuge et de Coriolis $C(q, \dot{q})$ est quadratique dans \dot{q} .
- On peut récrire l'équation dynamique si dessus comme :

$$M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) = \Phi(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)P$$

Où \ddot{q}_r et \dot{q}_r sont les vecteurs dimensionnels correspondants de n .

- Le système est linéarisé par retour d'état, ce qui veut dire, il existe une transformation non-linéaire telle que le système transformé est un système linéaire et contrôlable.
- Posant $X = [q^T \ \dot{q}^T]$, alors le système peut être entièrement linéarisé en employant la loi de commande non-linéaire :

$$\tau = M(q)U + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ I \end{bmatrix} U$$

Avec $U = \ddot{q}$, les techniques de commande linéaires peuvent être appliquées au modèle linéarisé.

2.7 Génération du mouvement :

La planification des mouvements des manipulateurs mobiles vise à obtenir des commandes en boucle fermée qui dirigent le système d'une configuration initiale à une configuration finale, sans envahissions des contraintes non holonomes. Plusieurs classes de mouvements sont envisager pour générer des trajectoires de mouvement mais la plus répondue est celle entre deux points pour passer d'une configuration initial vers une situation

final soit on génère une trajectoire libre entre ces deux situation, ou via des mouvements ayant des points intermédiaires.

Tant que la commande qui ce suit ce fait dans l'espace articulaire, donc on s'intéresse juste celle de trajectoire libre entre les situations en passant par des point intermédiaires [5] et [19].

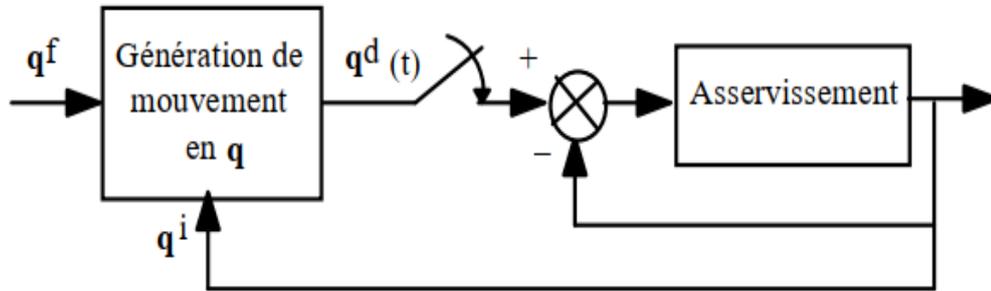


Figure 2. 6. Schémas de génération de mouvement dans l'espace articulaire [25].

2.7.1 Génération de mouvement entre deux points :

Le problème de suivi de trajectoire d'un manipulateur mobile non holonome peut être décrit comme suit. En considérant le manipulateur mobile représenté dans la figure si dessous. Ce système est décrit par l'équation (2.29) qui est soumise à des contraintes non holonome de l'équation (2.27). Réécrivant l'équation (2.29) comme :

$$\ddot{\zeta} = M_1^{-1}(q)[B_1(q)\tau - C_1(q, \dot{q})\dot{\zeta} - G_1(q)] \quad (2.30)$$

Pour avoir un système qui permette à l'organe terminal d'accomplir sa tâche, on doit concevoir une commande qui va l'aider à faire. Le contrôleur est conçu en deux étapes. Tout d'abord, une commande pour suivre le mouvement et la vitesse de l'organe terminal du manipulateur mobile en supposant que la trajectoire désirée est générée par des équations cinématiques et en utilisant ensuite comme entrée virtuelle à l'équation (2.29) et en calculant la commande des couples qui réalise le suivi asymptotique de trajectoire des systèmes du manipulateur mobile donné dans l'équation (2.27) pour toute trajectoire souhaitée [39].

$$\Psi_d = [\zeta_d \quad \dot{\zeta}_d \quad \ddot{\zeta}_d]^T = [\Psi_{bd}(t) \quad \Psi_{ad}(t)]^T$$

Prenant en considération de cette hypothèse :

La trajectoire désirée $\zeta_d(t)$ est supposée être limitée et uniformément continu, et les dérivés jusqu'au deuxième ordre sont limités et uniformément continus. La loi de commande à développer sert à converger toutes les variables vers la trajectoire donnée $\Psi_d = \Psi$ [39]

Pour simplifier l'objectif de cette partie, supposons que l'erreur de suivi de la trajectoire désirée est $e(t)$ et qu'elle peut être écrite sous la forme de l'équation (2.31) où $\Psi(t)$ représente la configuration de la vitesse de la plate-forme mobile et la position de l'organe terminal obtenu et $\Psi_d(t)$ indiquant la configuration souhaitée de la vitesse de la plate-forme mobile et la position de l'organe terminal [39].

$$\mathbf{e}(t) = \Psi - \Psi_d \quad (2.31)$$

L'objectif de contrôle peut être formulé comme suit : $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ et $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}(t) = 0$.

2.8 Commande des manipulateurs mobiles :

Les manipulateurs mobiles traitent une dynamique fortement couplée des plates-formes et des manipulateurs. Si on assume la dynamique connue, plusieurs commandes peuvent être utilisées pour un tel système non linéaire, ce non linéarité dû de l'accouplement entre les articulations. Échues aux incertitudes paramétriques de la dynamique du système, L'idée centrale de concevoir une commande attire beaucoup d'intérêt de recherches ces dernières années. Plusieurs approches ont traité pour faire commander les mobiles manipulateurs [4].

Le but du contrôle de mouvement est de faire en sorte que les articulations du robot suivent une trajectoire d'un dans le temps, en fonction de la position souhaitée de l'articulation. Takegaki et Arimoto [10], Arimoto et Miyazaki [11] et ont montré que des régulateurs simples, tels que le Contrôleur proportionnel-dérivé (PD) et proportionnel-intégral-dérivé (PID) sont efficaces pour le contrôle général, malgré la non-linéarité et l'absence de linéarité. L'incertitude de la dynamique du robot. Divers types linéaires PD ou PID ont été étendus à une stratégie de contrôle PID non linéaire. Le vecteur de couple gravitationnel a été présenté par Hsia [12]. Une classe de contrôleurs non linéaires de type PD pour manipulateurs de robots a été proposée par Kelly et Carelli [13]. Seraji [14] a présenté l'analyse et la conception d'un contrôle PID non-linéaire avec un à l'extension au suivi.

Bucklaew et Liu [15] ont également proposé un gain non linéaire pour les contrôleurs de type PD dans les applications robotiques. De plus, Reyes et Rosado [16] ont proposé une famille polynomiale de contrôleurs de type PD pour robot manipulateurs. Toutefois, ces régulateurs PID sont difficiles à déterminer. Ensuite C.angie J, Valencia, Oscar F. Aviles et Mauricio F. Mauledoux [18] ont présenté la conception d'un contrôle PD et PID non linéaire pour les manipulateurs mobiles.

2.8.1 Commande PID d'un manipulateur mobile :

Réécrivant le modèle dynamique du manipulateur mobile représenté dans la (Figure 2.4):

$$M_1(q)\ddot{\zeta} + C_1(q, \dot{q})\dot{\zeta} + G_1(q) = B_1(q)\tau \quad (2.32)$$

Le modèle dynamique de l'équation (2.32) définit un système de n équations différentielles du second ordre non linéaires et couplées, n'étant le nombre d'articulations. Pourtant, dans une commande classique, qui est celle de la plupart des robots industriels actuels, le mécanisme est considéré comme un système linéaire et chacune de ses articulations est asservie par une commande décentralisée de type PID à gains constants. Ses avantages sont la facilité d'implantation et le faible coût en calcul. En contrepartie, la réponse temporelle du robot variant selon sa configuration, on constate des dépassements de consigne et une mauvaise précision de suivi dans les mouvements rapides. Dans beaucoup d'applications, ces inconvénients ne représentent pas un gros handicap. En pratique, une telle commande est réalisée selon le schéma de la figure (Figure 2.7) [39].

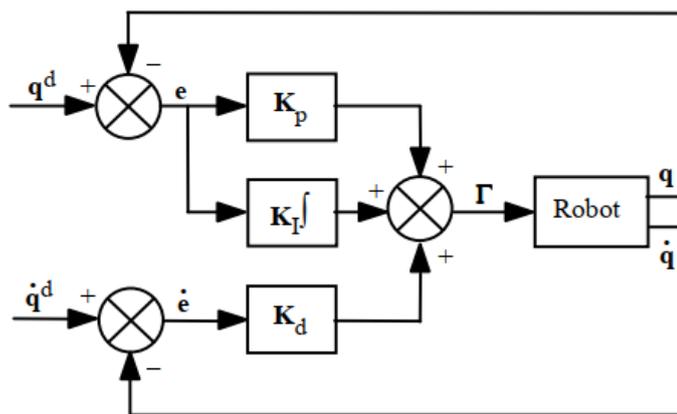


Figure 2. 7. Schéma classique d'une commande PID [25].

Supposant que la trajectoire désiré $d(t)$ est délimitée et uniformément continu, et les dérivés jusqu'au deuxième ordre sont aussi supposé limité et uniformément continu.

Posant :

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_\zeta &= \zeta - \zeta_d \\ \dot{\mathbf{e}}_\zeta &= \dot{\zeta} - \dot{\zeta}_d \\ \mathbf{e}_\zeta &= \mathbf{f}(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Où $\dot{\mathbf{e}}_\zeta$ est l'erreur de vitesse de la plateforme mobile et \mathbf{e}_ζ est l'erreur de position de l'organe terminal.

En prenant le couple de l'équation (2.32), on peut écrire une loi de commande qui est décrite dans l'équation (2.34).

$$\boldsymbol{\tau} = [\mathbf{K}_p]\mathbf{e}_\zeta + [\mathbf{K}_v]\dot{\mathbf{e}}_\zeta + [\mathbf{K}_i] \int \mathbf{e}_\zeta d\boldsymbol{\tau} \quad (2.34)$$

Où $[\mathbf{K}_p]$, $[\mathbf{K}_v]$, $[\mathbf{K}_i]$ des matrices diagonales définies positives, de dimension (n x n), dont les éléments génériques sont respectivement les gains proportionnels, les gains dérivés et les gains intégraux. Ces gains sont choisis pour chaque articulation i . représenté par le système linéaire du deuxième ordre à coefficients constants suivant [23]:

$$\boldsymbol{\tau}_j = \mathbf{M}_{ii \max} \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{F}_{vi} \dot{\mathbf{q}}_i + \boldsymbol{\gamma}_i \quad (2.35)$$

Où : \mathbf{F}_{vi} : rend compte aux termes de la vitesse

$\mathbf{M}_{ii \max}$: Sont les valeurs maximales des éléments M_{ii} de la matrice d'inertie.

$\boldsymbol{\gamma}_i$: Représente un couple perturbateur de chaque articulation.

En transformant l'équation (2.35) dans le domaine de Laplace pour tous les couples perturbateurs, on aura :

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_d - \left([\mathbf{I}_n]p^2 + [\mathbf{K}_p]p + [\mathbf{K}_v] + [\mathbf{K}_i] \frac{1}{p} \right)^{-1}$$

Les erreurs du modèle résorber avec le transitoire, donc :

$$([\mathbf{I}_n]p^3 + [\mathbf{K}_p]p^2 + [\mathbf{K}_v]p + [\mathbf{K}_i])^{-1}$$

Si les matrices choisies ont diagonal, on peut imposer :

$$p^3 + k_{vi} p^2 + k_{pi} p + k_{Ii} = p^3 + 3\mu_{1,i}\omega_i \cdot p^2 + 3\mu_{2,i}\omega_i^2 p + \omega_i^3$$

Avec :

$$k_{vi} = 3\mu_{1,i}\omega_i, \quad k_{pi} = 3\mu_{2,i}\omega_i^2, \quad k_{Ii} = \omega_i^3$$

Pour les bras manipulateurs, généralement on utilise les amortissements critiques $\mu_{1,i} = \mu_{2,i} = 1$ et pour une réponse rapide, la pulsation doit être la plus grande possible.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la description de la structure géométrique et cinématique des robots manipulateurs à chaîne ouverte simple ainsi que la plateforme mobile. Ensuite nous avons calculé le modèle dynamique par le formalisme de Lagrange pour le manipulateur mobile. Après, une méthodologie de planification a été développée pour un seul manipulateur mobile non holonome, en utilisant des fonctions polynomiales lisses et continues, à la fin, une commande PID non linéaire a été élaborée pour contrôler un manipulateur mobile sous les contraintes non holonomes afin de l'utiliser dans la coopération qui sera discutée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Coopération des manipulateurs mobiles

1.1 Introduction :

La coopération de plusieurs manipulateurs mobiles présente une augmentation significative de la complexité par rapport au cas d'un seul manipulateur mobile. Jusqu'à présent, il n'existe que quelques travaux qui ont traité le problème de coopération de multiples manipulateurs mobiles, ces travaux sont concentrés sur trois grands mécanismes :

- Commande de force de position hybride décentralisé/centralisé, dans lequel la position de l'objet est contrôlée dans une certaine direction de l'espace de travail, et la force interne de l'objet est contrôlée dans une petite plage de l'origine en prenant compte des contraintes de l'objet [2], [25], [28];
- Commande maître esclave où un ou un groupe de manipulateurs mobiles ou de manipulateurs robotiques jouent le rôle du maître suivant une trajectoire préétablie, et le reste des manipulateurs mobiles qui forment le groupe (esclave) suivant se déplaçant en conjonction avec les manipulateurs mobiles maîtres [27], [26], [29].
- Planification de trajectoire pour deux manipulateurs mobiles ou plus pour transporter un objet commun dans un environnement connu ou inconnu [6, 30,], utilisant le modèle dynamique qui est composée d'équations de mouvement de manipulateurs mobiles, mouvement de l'objet, contraintes non holonomie des plateformes mobiles et contraintes géométriques entre les organes terminaux et l'objet. Dans [30, 31, 32]

1.2 Description de système et hypothèse :

Considérons deux manipulateurs mobiles tenant un objet rigide commun dans un espace de travail illustrés à la figure 3.1. Pour faciliter la formulation dynamique, posant ces hypothèses :

- Chaque bras de manipulateurs mobiles n'est pas redondant, c'est-à-dire, le nombre de degrés de liberté de chaque bras est égal ou inférieur à 3.
- Supposant que la pince de l'organe terminal de chaque manipulateur mobile est rigide,
- les organes terminaux vont attient le même point.
- robot est loin des singularités dans l'espace opérationnel [4].

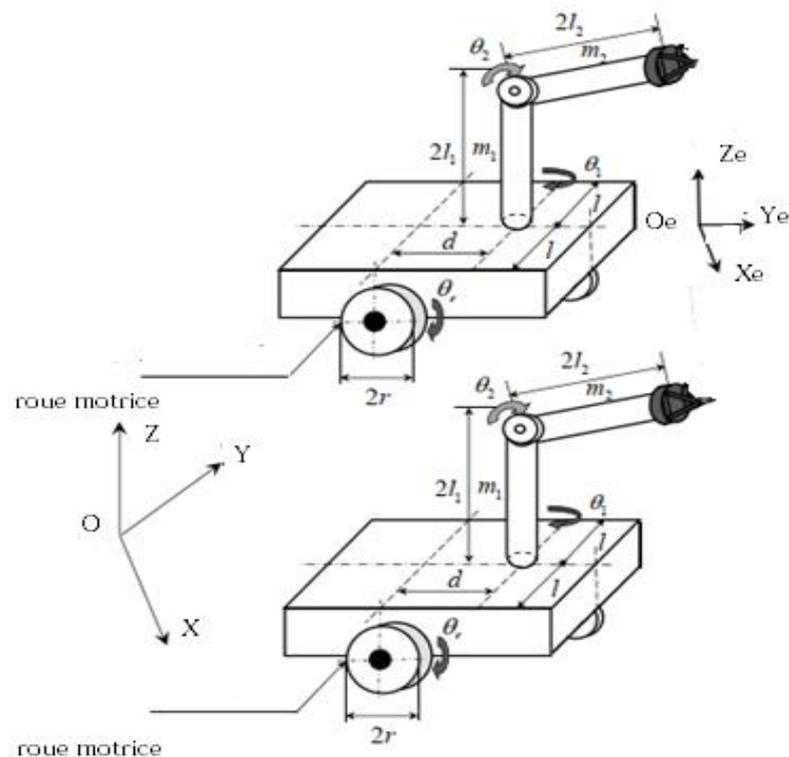


Figure 3. 1. Coopération de deux manipulateurs mobile [4].

1.3 Le modèle dynamique du système :

La modélisation de la coopération de deux manipulateurs mobile se base sur l'effet de la modélisation d'un seul robot en regroupant les dynamiques des deux manipulateurs mobiles dans une seule équation dynamique, La modélisation dynamique d'un seul robot est représentée par l'équation (2.29). Sachant que le modèle dynamique est dans l'espace articulaire pour réaliser la coopération faut d'abord la déterminer dans l'espace opérationnel [4].

Prenant les équations de position de l'organe terminal par rapport au repère de base qui sont décrit par (3.1) :

$$\begin{aligned}
 x_{ie} &= x_i - 2l_2 \cos \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \\
 y_{ie} &= y_i - 2l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \\
 z_{ie} &= 2l_1 - 2l_2 \sin \theta_{i2}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Avec x, y sont les positions du centre de masse de la base mobile et leurs vitesses correspondantes sont \dot{x}, \dot{y} .

Dérivons maintenant les équations (3.1), on aura :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{ie} &= \dot{x}_i + l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_i + l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i1} - l_2 \cos \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i2} \\
 \dot{y}_{ie} &= \dot{y}_i - l_2 \sin \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_i - l_2 \sin \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i1} - l_2 \cos \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i2} \\
 \dot{z}_{ie} &= l_2 \sin \theta_{i2} \dot{\theta}_{i2}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Remplaçons $\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i$, $\dot{y}_i = v_i \sin \theta_i$ et $\dot{\theta}_i = \omega_i$ dans (3.2) on aura :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{ie} &= v_i \cos \theta_i + l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \omega_i + l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i1} - l_2 \cos \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i2} \\
 \dot{y}_{ie} &= v_i \sin \theta_i - l_2 \sin \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \omega_i - l_2 \sin \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i1} - l_2 \cos \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i) \dot{\theta}_{i2} \\
 \dot{z}_{ie} &= l_2 \sin \theta_{i2} \dot{\theta}_{i2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

L'équation (3.3) est en fonction des vitesses linéaires et angulaires, donc on peut calculer la matrice jacobéenne de manipulateur mobile.

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{i11} & \mathbf{J}_{i12} & \mathbf{J}_{i13} & \mathbf{J}_{i14} \\ \mathbf{J}_{i21} & \mathbf{J}_{i22} & \mathbf{J}_{i23} & \mathbf{J}_{i24} \\ \mathbf{J}_{i31} & \mathbf{J}_{i32} & \mathbf{J}_{i33} & \mathbf{J}_{i34} \\ \mathbf{J}_{i41} & \mathbf{J}_{i42} & \mathbf{J}_{i43} & \mathbf{J}_{i44} \\ \mathbf{J}_{i51} & \mathbf{J}_{i52} & \mathbf{J}_{i53} & \mathbf{J}_{i54} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Avec :

$$\mathbf{J}_{i11} = \cos \theta_i, \mathbf{J}_{i12} = \mathbf{J}_{i13} = \mathbf{J}_{i14} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{J}_{i21} = \sin \theta_i, \mathbf{J}_{i22} = \mathbf{0}, \mathbf{J}_{i23} = \mathbf{0}, \mathbf{J}_{i24} = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{J}_{i31} = \cos \theta_i, \mathbf{J}_{i32} = l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i),$$

$$\mathbf{J}_{i33} = l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i), \mathbf{J}_{i34} = -l_2 \cos \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i)$$

$$\mathbf{J}_{i41} = \sin \theta_i, \mathbf{J}_{i42} = -l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i),$$

$$\mathbf{J}_{i43} = -l_2 \sin \theta_{i2} \sin(\theta_{i1} + \theta_i), \mathbf{J}_{i44} = -l_2 \cos \theta_{i2} \cos(\theta_{i1} + \theta_i)$$

$$\mathbf{J}_{i51} = \mathbf{J}_{i52} = \mathbf{J}_{i53} = \mathbf{0}, \mathbf{J}_{i54} = l_2 \sin \theta_{i2} \dot{\theta}_{i2}$$

Nous avons :

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}_i \quad (3.5)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_i + \dot{\mathbf{J}}_i(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_i \quad (3.6)$$

Avec $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$ est le pseudo inverse de la matrice jacobéenne, réécrivant le modèle dynamique d'un des manipulateurs mobiles dans (3.7) :

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{G}_i(\mathbf{q}_i) = \mathbf{B}(\mathbf{q}_i) \boldsymbol{\tau}_i \quad (3.7)$$

Le modèle dynamique est dans l'espace articulaire, on le transforme dans l'espace opérationnel qui est représenté par l'équation (3.8) :

$$\mathbf{M}_{xi}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{xi}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{G}_{xi}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{xi} \quad (3.8)$$

Avec :

$$\mathbf{M}_{xi} = \mathbf{J}_i^{+T} \mathbf{M}_i \mathbf{J}_i^+$$

$$\mathbf{C}_{xi} = \mathbf{J}_i^{+T} \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{J}}_i^+ + \mathbf{J}_i^{+T} \mathbf{C}_i \mathbf{J}_i^+$$

$$\mathbf{G}_{xi} = \mathbf{J}_i^{+T} \mathbf{G}_i$$

$$F_{xi} = J_i^{+T} B(q_i) \tau_i$$

Combinant les équations dynamiques des manipulateurs mobiles I et II donné par (3.8) dans (3.9), on aura :

$$M(q)\ddot{x} + C(\dot{q}, q)\dot{x} + G(q) = F \quad (3.9)$$

Avec :

$$M = \text{diag}([M_{x1} \quad M_{x2}]^T)$$

$$C = \text{diag}([C_{x1} \quad C_{x2}]^T)$$

$$G = \text{diag}([G_{x1} \quad G_{x2}]^T)$$

$$F = \text{diag}([F_{x1} \quad F_{x2}]^T)$$

$$x = [x_1 \quad x_2]^T, \dot{x} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2]^T, \ddot{x} = [\ddot{x}_1 \quad \ddot{x}_2]^T$$

1.4 Loi de commande :

Le but du contrôle est de générer un ensemble d'entrées de couple de telle sorte que la position de suivi d'erreur pour la position désiré transporter dans l'espace de travail converge asymptotiquement vers zéro. Formellement, le problème de contrôle consiste à concevoir l'entrée de commande [18] :

$$U = f(\dot{X}_1, \dot{X}_2, X_2, X_1) \quad (3.10)$$

Alors les limites seront :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X_i - X^d\| = 0, \text{ et } \lim_{t \rightarrow \infty} \|\dot{X}_i - \dot{X}^d\| = 0.$$

Avec X_i et \dot{X}_i sont la position et la vitesse initial de chaque manipulateur mobile hors que X^d et \dot{X}^d représentent la position et la vitesse à atteindre.

Le couple a était calculer par la loi suivante :

$$\tau = [K_p](X_i - X^d) + [K_v](\dot{X}_i - \dot{X}^d) + [K_i] \int (X_i - X^d) d\tau$$

1.5 Résultat de simulation :

Dans la simulation le premier manipulateur mobile suit une trajectoire tangentielle partant d'une position initial de $x_i = 5, y_i = 10, \theta_i = 0$ jusqu'à atteint une position de $x_f = 70, y_f = 70, \theta_f = 0$ d'une droite Figure 3. 2 le deuxième manipulateur mobile suis la trajectoire générer par le premier robot, La Figure 3. 3 montres les signaux de la manipulabilité et pour les valeur de PID on a $K_p = diag[10], K_i = diag[5], K_d = diag[1]$.

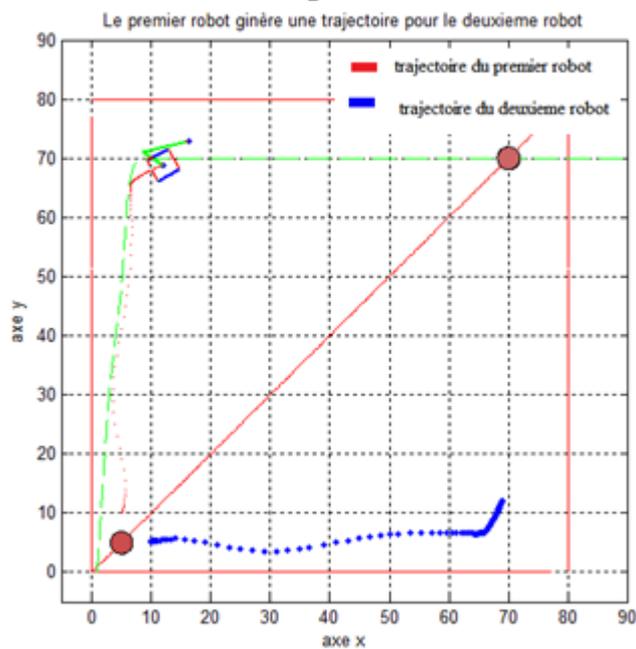


Figure 3. 2. Trajectoire de manipulateur mobile 2 générer par le manipulateur mobile 1.

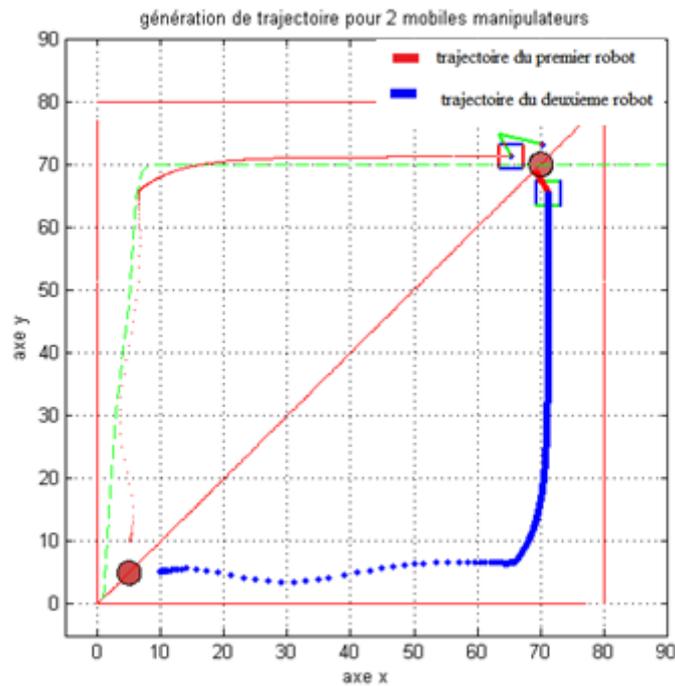


Figure 3. 3. La coopération des deux manipulateurs mobiles.

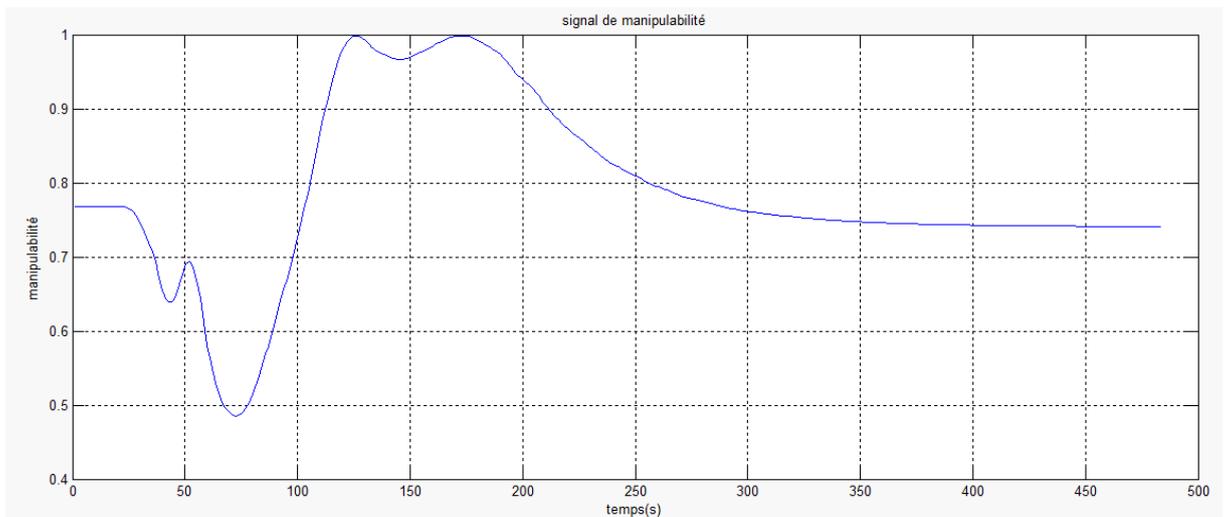


Figure 3. 4. Signal de manipulabilité.

Les manipulateurs mobiles se déplacent de point de départ vers le point désiré, tout en poursuivant une trajectoire désiré. Le premier robot en vert suie cette trajectoire et qui génère ensuite la trajectoire désiré pour le deuxième robot en respectant une symétrie par rapport à la diagonale de l'espace connue.

On remarque bien que le suivi de trajectoire est instable au début pour le cas du premier robot qu'il avait des oscillations puis il se stabilise pour une manipulabilité de 0.76 tandis que la valeur maximal donné est égal à 1, ces oscillations dû d'une part aux contraintes non holonome qui ont une grande influence sur le modèle choisie et le choix des paramètres des contrôleurs qui ont choisis de manière identique pour tous les articulation et aux couplement des articulations qui influe l'une sur l'autre. Pour réduire ses oscillations on peut ajouter des PID adaptatif ou contrôleurs flou ou neuronal.

Conclusion

Dans ce chapitre nous sommes présentés le modèle dynamique cartésien d'un manipulateur mobile a fin de l'utiliser dans la coopération des manipulateurs mobiles en utilisant le formalisme d'Euler-Lagrange et nous avons illustré et discuté les résultats de la simulation obtenue, et on a montré l'efficacité du contrôleur proposés dans la commande non linéaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

La coopération des manipulateurs mobiles étudiés dans le présent mémoire est un système non linéaire, du fait que sa modélisation cinématique et dynamique abouti à des équations différentielles obtenues en utilisant le formalisme d'Euler-Lagrange qui prend en compte les forces gravitationnelles et les contraintes non holonome, dont les coefficients sont variables suivant les paramètres mécaniques du manipulateur mobile et les configurations des mouvements désirés.

Malgré ces complexités, on a pu implémenter un modèle mathématique d'un manipulateur mobile ayant une commande classique proportionnel intégrale dérivé (PID). Ces équations ont ensuite été utilisées pour les coopérer dans un programme sur Matlab qui retourne, pour une trajectoire donnée, les résultats de la coopération des deux manipulateur mobiles identiques sont bien satisfaisant avec une bonne précision car les robots suivent bien la trajectoire désiré.

Cette étude nous a été une expérience très avantageuse et enrichissante. Elle nous a permet de s'initier dans les nouvelles technologies de la robotique en générale et les robots multiples en particulier. Il nous a aidés comprendre les méthodes pour avoir un modèle mathématique par modélisation géométrique et cinématique.

Bien que l'objectif global de la thèse ait été atteint, il y a encore beaucoup d'améliorations qui pourraient être apportées afin de faire de un contrôleur plus robuste (flou, adaptatif), afin de mieux améliorer les performances de la toute structure.

Annexe :

Le modèle dynamique est donnée par (formalisme de Lagrange) est [4]:

$= [\tau_r \ \tau_l \ \tau_1 \ \tau_2]^T$: Le vecteur des couples/ forces d'entrée

$q = [\theta_r \ \theta_l \ \theta_1 \ \theta_2]^T$: Le vecteur de position articulaire.

v : La vitesse linéaire de la plateforme mobile ;

θ : L'angle de direction de la plate-forme mobile ;

ω : La vitesse angulaire de la plate-forme mobile, et $\omega = \dot{\theta}$;

l_1, l_2 : Longueur de liaison du manipulateur ;

r : Le rayon des roues ;

$2l$: La distance des entre la roue gauche et la roue droite ;

d : La distance entre le manipulateur et le centre de la base mobile ;

g : La gravité.

Les positions du centre de masse pour deux roues sont données par :

$$x_r = x + l \sin \theta \quad (\text{A.1})$$

$$y_r = y - l \cos \theta \quad (\text{A.2})$$

$$x_l = x - l \sin \theta \quad (\text{A.3})$$

$$y_l = y + l \cos \theta \quad (\text{A.4})$$

Qui conduisent aux vitesses suivantes :

$$\dot{x}_r = \dot{x} + l\dot{\theta} \cos \theta \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{y}_r = \dot{y} + l\dot{\theta} \sin \theta \quad (\text{A.6})$$

$$\dot{x}_l = \dot{x} - l\dot{\theta} \cos \theta \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{y}_l = \dot{y} - l\dot{\theta} \sin \theta \quad (\text{A.8})$$

Les positions du centre de masse du bras manipulateur 2-ddl sont données par :

$$x_1 = x + d \cos \theta \quad (\text{A.9})$$

$$y_1 = y + d \sin \theta \quad (\text{A.10})$$

$$x_2 = x + d \cos \theta - l_2 \sin \theta_2 \cos(\theta + \theta_1) \quad (\text{A.11})$$

$$y_2 = y + d \sin \theta - l_2 \sin \theta_2 \sin(\theta + \theta_1) \quad (\text{A.12})$$

$$z_2 = 2l_1 - l_2 \cos \theta_2 \quad (\text{A.13})$$

Ces équations conduisent aux vitesses correspondantes en tant que :

$$\dot{x}_1 = \dot{x} - d\dot{\theta} \sin \theta \quad (\text{A.14})$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y} + d\dot{\theta} \cos \theta \quad (\text{A.15})$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x} - d\dot{\theta} \sin \theta - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \cos(\theta + \theta_1) + l_2 \sin \theta_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta} + \dot{\theta}_1) \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y} + d\dot{\theta} \cos \theta - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \sin(\theta + \theta_1) - l_2 \sin \theta_2 \cos(\theta + \theta_1)(\dot{\theta} + \dot{\theta}_1) \quad (\text{A.17})$$

$$\dot{z}_1 = l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \quad (\text{A.18})$$

L'énergie cinétique totale est :

$$K = K_p + K_1 + K_2 + K_r + K_l \quad (\text{A.19})$$

Où :

$$K_p = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}^2$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta} + \dot{\theta}_1)^2$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + (l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2)^2) + \frac{1}{2} I_{z2} (\dot{\theta} + \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} I_{y2} \dot{\theta}_2^2$$

$$K_r = \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + \frac{1}{2} I_{yw} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{yw} \dot{\theta}_r^2$$

$$K_l = \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2) + \frac{1}{2} I_{yw} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{yw} \dot{\theta}_l^2$$

Puisque les contraintes non holonomes sont intégrées par x, y, θ , donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos\theta & \frac{r}{2} \cos\theta \\ \frac{r}{2} \sin\theta & \frac{r}{2} \sin\theta \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2l} & 0 & 0 \\ \frac{r}{2} & -\frac{r}{2l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

Du modèle dynamique s'écrit :

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} = \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \quad (\text{A.21})$$

Où :

$$\mathbf{M}(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}, \mathbf{C}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}(q) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -m_2 g l_2 \sin \theta_2]^T$$

A partir de (A.20) on peut avoir les vitesses linéaires et angulaires comme coordonnés généralisés :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{l}{r} & 0 & 0 \\ \frac{r}{2} & -\frac{l}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

Puisque r est un paramètre fixe pour le système, R peut être traité comme une matrice constante. Considérant (A.22), $\dot{\zeta} = [v \ \omega \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ et nous pouvons réécrire la dynamique comme suit

$${}^T M(q) \ddot{\zeta} + {}^T C(q, \dot{q}) \dot{\zeta} + {}^T G(q) = {}^T B \tau \quad (\text{A.23})$$

Avec

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ r & r & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bibliographies

Bibliographies:

- [1] David DeVon et Timothy Bretl, “*Kinematic and Dynamic Control of a Wheeled Mobile Robot*”, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007.
- [2] O. Khatib, K. Yokoi, K. Chang, D. Ruspini, R. Holmberg, and A. Casal, “*Coordination and decentralized cooperation of multiple mobile manipulators,*” J. Robot. Syst., vol. 13, no. 11, pp. 755–764, Nov. 1996
- [3] M. Mustafa, A. Ramirez-Serrano, K. A. Davies, and G. N. Wilson. “*Modeling and Autonomous Control of Multiple Mobile Manipulators Handling Rigid Objects*” Intelligent Robotics and Applications. International Conference on Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2012: pp 397- 406
- [4] Z. Li, S Sam Ge. “*Modeling and Control of Mobile Manipulators*”. CRC Press Taylor & Francis Group. 2013
- [5] Khalil W., Dombre E., *Modélisation, identification and control of robots*, Hermès Penton Science, London, ISBN 1-90399-613-9, 2002,
- [6] Y. Yamamoto and X. Yun, “Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator,” *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 39, no. 6, pp. 1326-1332, 1994.
- [7] Y. Yamamoto and X. Yun, “Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 816-824, 1996.
- [8] J. Tan, N. Xi, and Y. Wang, “Integrated task planning and control for mobile manipulators,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 5, pp. 337-354, 2003.
- [9] O. Khatib, “Mobile manipulation: the robotic assistant,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26, no. 2-3, pp. 175-183, 1999.
- [10] Takegaki, M., S. Arimoto. A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulator. *Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control*, Vol. 102, 1981, pp 119-125.

- [11] Arimoto, S.F. Miyazaki. “*Stability and Robustness of PD Feedback Control With Gravity Compensation for Robot Manipulator*”. In: F. W. Paul, D. Youcef-Toumi, Eds. *Robotics: Theory and Practice*, Vol. 3, 1986, pp. 67 – 72.
- [12] Hsia, T. C. Robustness Analysis of a PD Controller with Approximate Gravity Compensation for Robot Manipulator Control. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 11, 1994, 517-521.
- [13] Kelly, R., R. Carelli. A Class of Nonlinear PD-Type Controllers for Robot Manipulators. *Journal of Robotic Systems*, Vol.13,1996,793-802.
- [14] Seraji, H. A New Class of Nonlinear PID Controllers with Robotic Applications. *Journal of Robotic Systems*, Vol.15,1998,pp61-81.
- [15]. Bucklaew, T. P., C. S. Liu. A New Nonlinear Gain Structure for PD-Type Controllers in Robotic Applications. – *Journal of Robotic Systems*, Vol. 16, 1999, 627-649.
- [16]. Reyes, F., A. Rosado. Polynomial Family of PD-Type Controllers for Robot Manipulators. *Control Engineering Practice*, Vol. 13, 2005, 441-450.
- [17]. Ye, J. Adaptive Control of Nonlinear PID-Based Analog Neural Networks for a Nonholonomic Mobile Robot. – *Neurocomputing*, Vol. 71, 2008, 1561-1565.
- [18] C.angie J,Valencia, Oscar F. Aviles et Mauricio F. Mauledoux’’ PD+ and PID Control for a Mobile Manipulator of Eight Degrees of freedom ’’ *Journal of engineering and Applied Sciences* 13(12), 2018, 4273-4278.
- [19]M W. Spong, S Hutchinson, et M. Vidyasagar « *Robot Modeling and Control* » First Edition, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [20] N. MORETTE. ’’ Contribution à la Navigation de robots mobiles : approche par modèle direct et commande prédictive ’’. THÈSE, l’université d’Orléans, Décembre 2009
- [21] Kevin M. Lynch and Frank C. Park ’’ *Modern Robotics Mechanics, Planning, and Control*’’, Cambridge University Press, May, 2017
- [22] L. Adouane. ’’Architecture de contrôles comportementaux et réactifs pour la coopération d’un groupe de robots mobiles’’. PHD thesis, université de Franche-Comté, 2005.

- [23] Julien Beaudry. Machines décisionnelle pour systèmes multi-robots coopératifs. PHD thesis, Ecole polytechnique, 2006.
- [24] W. KHALIL et E. DOMBRE « Bases de la modélisation et de la commande des robots-manipulateurs de type série »GOR Robotique **mai 2012**.
- [25] Y. Yamamoto, Y. Hiyama, and A. Fujita, “*Semi-autonomous reconfiguration of wheeled mobile robots in coordination*”. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 3456-3461, 2004.
- [26] Y. Hirata, Y. Kume, T. Sawada, Z. Wang, and K. Kosuge, “Handling of an object by multiple mobile manipulators in coordination based on caster-like dynamics,” *Proc. IEEE International Conference Robotics and Automation* vol.26, pp. 807-812, 2004.
- [27] T. G. Sugar and V. Kumar, “Control of cooperating mobile manipulators,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, pp. 94-103, 2002
- [28] H. G. Tanner, S. Loizou and K. J. Kyriakopoulos, “Nonholonomic navigation and control of cooperating mobile manipulators,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, pp. 53-64, 2003.
- [29] R. Fierro, L. Chaimowicz, and V. Kumar, “Multi-robot cooperation,” *Autonomous Mobile Robots: Sensing, Control, Decision Making and Application*, S. S. Ge and F. L. Lewis, Eds., Boca Raton: Taylor & Francis Group, pp. 417-459, 2006.
- [30] Y. Yamamoto S. Fukuda “*Trajectory Planning of Multiple Mobile Manipulators with Collision Avoidance Capability*” Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC, May 2002.
- [31] H. Bolandi and A. F. Ehyaei “*TRAJECTORY PLANNING OF TWO COOPERATIVE MOBILE MANIPULATORS UNDER CLOSED-CHAIN AND DIFFERENTIAL CONSTRAINTS*” International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 8, Number 2, ICIC International, February 2012.
- [32] S. Furuno, M. Yamamoto and A. Mohri “*Trajectory Planning of Cooperative Multiple Mobile Manipulators*” Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada ' October 2003.
- [33] [CLOS] Réalisation d'un robot à chenilles, SMP.fr.
- [34] <https://asimo.honda.com>.

[35] <http://www.robotblog.fr/animaux>.

[36] Z. Li, S. S. Ge “*Adaptive Robust Motion/Force Control of Holonomic-Constrained Nonholonomic Mobile Manipulators*”, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS- PART B: CYBERNETICS, VOL. 37, NO. JUNE 2007.

[37] L. Zineb ”*La modélisation d’un système de coopération et communication dans la navigation des robots mobiles*” thèse de doctorat, Université d’Oran, 13/12/2015.

[38] S. Noureddine, ”*SYSTEME DE LOCALISATION POUR ROBOTS MOBILES*” these de doctorat UNIVERSITE DE BATNA, 23/ 11/ 2005.

[39] B. Patel. ”*BACKSTEPPING-ADAPTIVE CONTROL OF MOBILE MANIPULATORS FOR TRAJECTORY TRACKING*”. Master, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia August 2016.