

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Automatique

Laboratoire de commande des processus



Mémoire de

Master en Automatique

**Commande d'une formation de robots
mobiles par l'approche structure virtuelle**

Mr. LAOUATI Salah Eddine

Sous la direction de : M. Mohammed TADJINE

Professeur

M. Massoud CHAKIR

Docteur

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2017

Composition du Jury :

Mr. Mohamed Seghir BOUCHERIT

Professeur ENP

Mr. Mohamed TADJINE

Professeur ENP

Mr. Messaoud CHAKIR

MCB ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Automatique

Laboratoire de commande des processus



Mémoire de

Master en Automatique

**Commande d'une formation de robots
mobiles par l'approche structure virtuelle**

Mr. LAOUATI Salah Eddine

Sous la direction de : M. Mohammed TADJINE

Professeur

M. Massoud CHAKIR

Docteur

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2017

Composition du Jury :

Mr. Mohamed Seghir BOUCHERIT

Professeur ENP

Mr. Mohamed TADJINE

Professeur ENP

Mr. Messaoud CHAKIR

MCB ENP

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers Parents ABD ELKRIM & AKILA qui Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

À mes très chères sœurs SABAH, SOUAD, HOUDA, MARIAMA et HANA et ma belle-sœur NABILA mes très chers frères NABIL, KHALED, ATMANE et ISMAIL et mes beaux-frères MOURAD et ABD EL KADER, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

À tous les membres de ma famille, petits et grands. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection.

À mes chers amis, en témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble.

À mon binôme BASSEM, en témoignage des nuits blanches et des disputes qui nous uni et aux souvenirs mémorables, je suis très reconnaissant aux efforts que vous avez faits.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.

LAOUATI Salah Eddine

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à ALLAH le tout puissant, pour le courage et la patience qu'il nous a donné pour accomplir ce travail.

Nous souhaiterions adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apportés leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Nos profonds remerciements s'adressent à nos encadrants ; Monsieur TADJINE Mohamed et Monsieur CHAKIR Messaoud qui se sont toujours montrés disponibles et à l'écoute tout au long du travail. Nous vous remercions aussi pour vos conseils. Veuillez trouver ici, l'expression de notre gratitude et notre grande estime.

Nos remerciements s'adressent aux membres du jury ; Mr BOUCHERIT Mohamed Seghir qui a bien voulu présider ce jury et pour avoir bien voulu examiner ce travail. Vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce travail.

Nous devons un remerciement à tous les enseignants du département Automatique qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Une pensée particulière est adressée aux étudiants qui nous ont côtoyés quotidiennement durant nos années d'études au département en nous apportant leurs supports moral et intellectuel tout au long de notre mémoire. Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement, tous nos proches, amis et tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire, pour leur confiance, leur support inestimable et leurs sollicitudes. À toutes ces personnes, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

ملخص:

في هذا العمل، يتم دراسة السيطرة على تشكيل باستخدام استراتيجية هيكل الظاهري على مجموعة من الروبوتات المتنقلة. والأسباب الكامنة وراء استخدام هذه الطريقة هي حقيقة أنها تقدم متانة إضافية لاستقرار تشكيل فيما يتعلق الاضطرابات بالمقارنة مع النهج نموذجية تتبع الزعيم. ويظهر قابلية تطبيق النهج المدروسة في نتائج المحاكاة

.الكلمات المفتاحية: التحكم التعاوني، الهيكل الافتراضي، الروبوت المحمول

Abstract:

In this work, the control of a formation using virtual structure strategy on a group of mobile robots is studied. The reasons behind the use of this method is the fact that these introduce additional robustness to formation stability with respect to perturbations as compared to typical leader-follower approaches. The applicability of the studied approach is shown in the results of simulation.

Key words: cooperative control, virtual structure, mobile robot.

Résumé :

Dans ce travail, on étudie le contrôle d'une formation utilisant une stratégie de structure virtuelle sur un groupe de robots mobiles. Les raisons de l'utilisation de cette méthode sont le fait qu'elles introduisent une robustesse supplémentaire à la stabilité de la formation en ce qui concerne les perturbations par rapport aux approches typiques de leader-suiveur. L'applicabilité de l'approche étudiée est présentée dans les résultats de la simulation.

Mots clés : contrôle coopératif, structure virtuelle, robot mobile.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	
introduction generale	9
1 Rappelles théoriques	11
1.1 Generalites sur les formation	11
1.2 Commande des formations	13
1.2.1 Stabilité	13
1.2.2 Commandabilité	14
1.3 architectures de commande.....	14
1.3.1 Centralisée.....	14
1.3.2 Décentralisée	15
1.3.3 Hiérarchique.....	16
1.3.4 Hybride.....	17
1.4 Stratégie de commande	17
1.4.1 Approches comportementales et champs de potentiels.....	17
1.4.2 Approches structures virtuelle.....	18
1.4.3 Approches leader-follower.....	19
1.4.4 autres approches	20
1.5 Evaluation des formations.....	20
1.5.1 avantages d'une formation de robots	20
1.5.2 inconvénients d'une formation de robots.....	21
2 Commande coopérative d'une formation par l'approche structure virtuelle	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Définition	22
2.3 Mouvement en formation.....	23
2.3.1 Ajuster la formation	25
2.3.2 Trajectoire de la structure virtuelle	26

2.3.3	trajectoire du robot mobile	26
2.4	resultats de simulation.....	27
2.5	conclusion	27
3	conclusion generale	30
	Bibliographie	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Exemples de formation.	12
Figure 1-2 : Différents types de formation : (a) colonne, (b) ligne, (c) V inversé... ..	12
Figure 1-3 : Commande centralisée.	15
Figure 1-4 : Commande décentralisée.	16
Figure 1-5 : Commande hiérarchique.	16
Figure 1-6 : (a) leader follower type L – ϕ , (b) leader follower type L – L.	19
Figure 2-1 : Relations géométriques entre les robots mobiles et la structure virtuelle imposée.....	23
Figure 2-2 : Flux de control bidirectionnel.....	24
Figure 2-3 : Illustration de l'algorithme de commande par la structure virtuelle	25
Figure 2-4 : Suivi d'une trajectoire circulaire en utilisant l'approche structure virtuelle.....	27

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La robotique telle qu'elle est connue aujourd'hui est une science interdisciplinaire comprenant de vastes champs de recherche : la vision, la planification, la commande du mouvement, le design, etc. Cependant, l'un des problèmes les plus importants reste la coopération, la planification et la coordination des mouvements au sein d'une architecture de commande dans un contexte multi-robots. L'étude des systèmes multi-robots est devenue une préoccupation majeure dans le milieu de la recherche en robotique, car quelles que soient les capacités d'un robot unique, il reste spatialement limité. Bien que le champ des systèmes multi-robots étende la recherche sur les systèmes mono-robot, c'est aussi une discipline à part entière car ils peuvent accomplir des tâches plus complexes que des robots simples ne peuvent pas réaliser.

Ce travail concerne la commande coopérative par l'approche structure virtuelle d'un système robotique constitué de multiples véhicules autonomes homogènes. C'est-à-dire comment définir les commandes de mouvement pour chaque véhicule du groupe pour réaliser des missions d'une manière à garder une formation : garder une configuration géométrique lors de la navigation du groupe dans son environnement.

Dans le chapitre 1 nous rappelons quelque notion sur la commande de formation des robots mobiles. Par la suite, dans le chapitre 2 nous présentons l'approche structure virtuelle avec des résultats de simulation sur MATLAB.

CHAPITRE 1 :

RAPPELLES THEORIQUES

1 RAPPELLES THEORIQUES

1.1 GENERALITES SUR LES FORMATION

Dans la mise en œuvre d'un système multi-robots [1], nous pouvons distinguer deux types de comportements :

- Les comportements compétitifs ; où chaque robot cherche à améliorer ses performances au détriment des autres, plus ou moins volontairement.
- Les comportements collaboratifs ; où les robots prennent en considération les objectifs des autres afin d'améliorer un résultat global.

Les cas qui nous intéressent sont de type collaboratif. On peut distinguer plusieurs niveaux dans la collaboration entre robots :

- La coordination est la forme la plus simple. Elle consiste essentiellement à synchroniser les actions des différents robots de façon à respecter l'ordre des tâches d'un plan global. Chaque robot a ses buts et sa liste de tâches propres. Un exemple de coordination est la régulation du trafic aérien de façon à éviter les collisions entre avions dont les plans de vol sont indépendants. (Figure 1-1(a))
- La coopération vise à mettre en œuvre plusieurs robots pour réaliser une tâche commune. Cette situation peut venir du fait qu'un robot seul n'a pas la capacité ou les outils pour réaliser la tâche demandée. La coopération implique évidemment l'existence d'une bonne coordination entre les robots. La coopération peut être une action ponctuelle au cours de l'exécution des missions des robots, ou s'étendre sur une plus longue période.
- La formation est un cas particulier de coopération. Au cours d'un déplacement en formation, les robots conservent un but commun en termes de position à atteindre ou de trajectoire à réaliser. De plus, ce déplacement se fait dans un espace de dimensions réduites. L'objectif est de pouvoir réaliser à tout moment des tâches en coopération, les robots assurant la coordination spatiale et temporelle. Ce type de déplacement est très bien adapté au convoyage d'un ensemble de robots. (Figure 1-1 (b)).

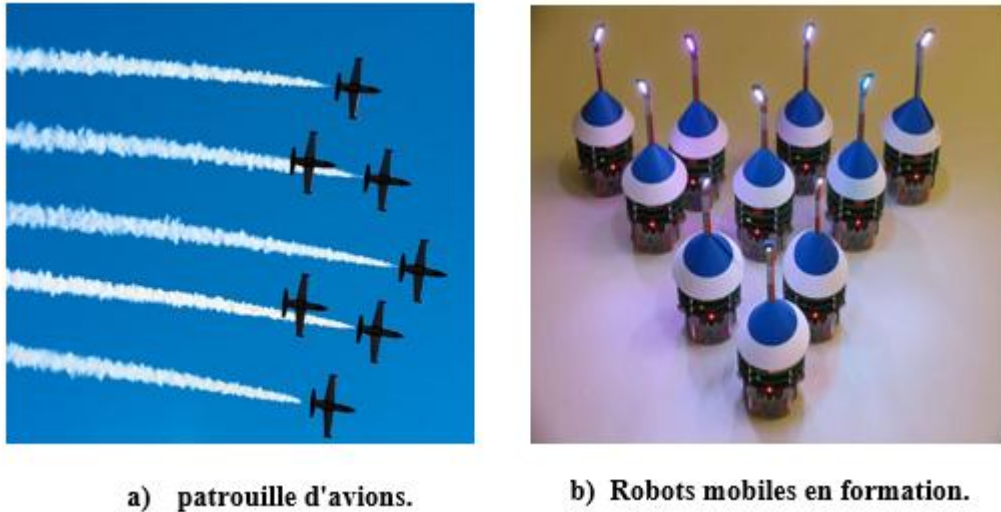


Figure 1-1 : Exemples de formation.

Définition : Une formation est une organisation d'un groupe d'engins se déplaçant ensemble, dans un espace restreint, et partageant des buts et des contraintes [2].

Au cours d'un déplacement en formation, nous pouvons définir de façon géométrique les relations de distance entre les robots. La géométrie d'une formation doit avant tout avoir un intérêt pratique d'amélioration de l'efficacité et de la sécurité du groupe. Notre objectif est de déterminer une géométrie adaptée à l'environnement en s'affranchissant des schémas classiques tels que les formations en « V inversé », « diamant », « colonne », « ligne » et « cercle ». Ces formations sont illustrées dans la figure suivante.

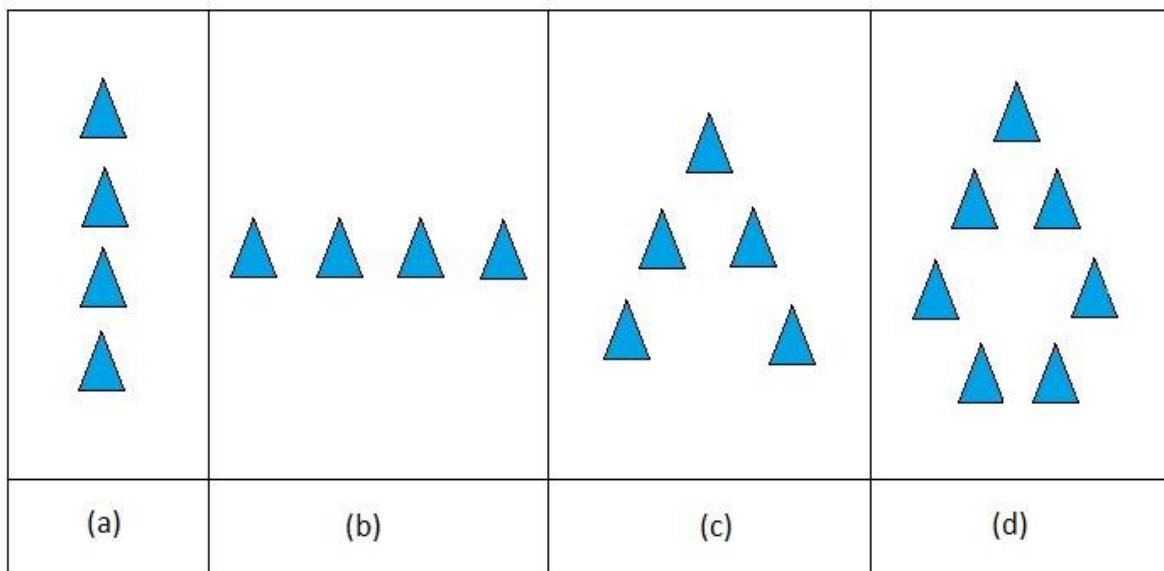


Figure 1-2 : Différents types de formation : (a) colonne, (b) ligne, (c) V inversé.

1.2 COMMANDE DES FORMATIONS

Il y a plusieurs critères qui doivent être pris en considération pour la conception d'un contrôleur de formation, tels que la stabilité et la commandabilité. Différentes approches pour le contrôle ont été mises en avant pour résoudre ces problèmes, avec notamment les stratégies de leader-follower, les structures virtuelles ou les méthodes comportementales. Cette section aborde ces différentes notions.

1.2.1 STABILITE

La stabilité est la capacité d'un système à revenir naturellement dans une position l'équilibre après avoir reçu une perturbation, l'un des théorèmes qui garantit la stabilité des systèmes est le théorème de Lyapunov, dont l'énoncé est le suivant :

Soit $q = 0$ un point d'équilibre du système $\dot{q} = f(q)$. Soit une fonction $V : R^n \rightarrow R$ continue différentiable tel que :

1. V est définie positive sur D .
2. $\lim_{t \rightarrow +\infty} \|q\| = \infty \Rightarrow \lim_{t \rightarrow +\infty} \dot{V}(q) = \infty$.
3. $\dot{V} < 0$ pour $q \neq 0$.

Alors, $q = 0$ est globalement asymptotiquement stable.

Pour les formations de robots mobiles on peut distinguer deux concepts de stabilité différents :

1.2.1.1 Stabilité de corde et de grille (String and mesh stability)

La stabilité de formation dans l'espace 1D s'appelle la stabilité de corde « string », elle concerne la propagation d'une perturbation dans une formation en colonne. Une colonne est stable si l'effet d'une perturbation à la source est amorti quand elle se déplace vers les followers, la généralisation de cette stabilité à l'espace 2D donne la stabilité de grille « mesh stability » qui garantit une atténuation des erreurs pour des systèmes interconnectés. De plus, la stabilité est [3] préservée lorsque le système est agrandi suivant certaines conditions [4].

Une formation est dite string stable si l'erreur ϵ_i de i ème agent et l'erreur ϵ_{i+1} de $(i+1)$ ème agent telle que : $\|\epsilon_i\| < \|\epsilon_{i+1}\|$ pour un système linéaire de sortie $y = h * u$ donne :

$$\|y(t)\| < \|h(t)\| \cdot \|u(t)\|$$

Cette condition peut être généralisée pour le cas mesh stabilité (MIMO) et on aura la condition suivante :

$$\|(\mathbf{t})\| < \max \Sigma \|h_{ij}(\mathbf{t})\| \cdot \|(\mathbf{t})\|_{nj=1}$$

1.2.1.2 Stabilité LFS (leader-to-formation stability)

Stabilité LFE est basée sur l'approche leader-follower. Cette approche diffère de la stabilité de grille dans le sens où elle met davantage l'accent sur la façon dont le comportement du leader peut affecter les erreurs d'interconnexion dans la formation.

On considère une formation de robot mobile qui a le vecteur $u = [v, \omega]^T$ comme entrée de commande et soit une distance ℓ et un angle relatif φ entre le leader et son suiveur et θ l'orientation de robot, soit le vecteur d'état suivant : $z_{ij} = [l_{ij}, \varphi_{ij}, \theta_{ij}]$

Définition : Une formation est dite LFS s'il existe une fonction β et une fonction γ , tel que pour toute erreur initiale $z(0)$ et pour toute entrée bornée u , l'erreur z satisfait :

$$\|(\mathbf{t})\| \leq \beta(\|z(0)\|, t) + \Sigma \gamma(\sup \|u\|_{i \in n})$$

Où les fonctions $\beta(r, t)$ et $\gamma(r)$ sont les gains transitoires et asymptotiques de la LFS [3].

1.2.2 COMMANDABILITE

La théorie des graphes est un outil important pour l'analyse de la stabilité d'une formation. Elle permet de représenter les interconnexions entre des robots et en particulier les échanges d'informations. La topologie d'un graphe permet d'étudier la stabilité, mais aussi la commandabilité du système. Un système est dit commandable [4] si quel que soit l'état à l'instant initial, et quel que soit l'état à l'instant final, il existe une commande appliquée sur un intervalle de temps fini, qui permet de rejoindre l'état final partant de l'état initial. Il est également possible d'utiliser cette théorie pour choisir un contrôleur approprié à la configuration de la formation, s'il existe [3].

1.3 ARCHITECTURES DE COMMANDE

La robustesse des systèmes multi-robots est strictement liée à la structure de commande utilisée pour organiser les agents et obtenir le comportement émergent désiré. Quatre architectures différentes peuvent être identifiées dans le domaine des systèmes multi-robots, qui sont résumées ci-dessous [2].

1.3.1 CENTRALISEE

Un superviseur global reçoit l'information des membres du groupe et le comportement de l'essaim est coordonné à partir d'un point de contrôle unique. Cette

architecture présente l'avantage que toutes les informations sont collectées par une seule unité (**Figure 1-3**), ce nœud doit être assez puissant pour calculer la loi de commande pour chaque robot avec la prise en considération la possibilité d'avoir des tâches complexes. Le prix à payer est la complexité de calcul et la dépendance des robots vis-à-vis du superviseur. En pratique, le nombre de calculs augmente très rapidement en fonction du nombre de robots et le problème devient rapidement insoluble pour une flottille de plus de dix robots.

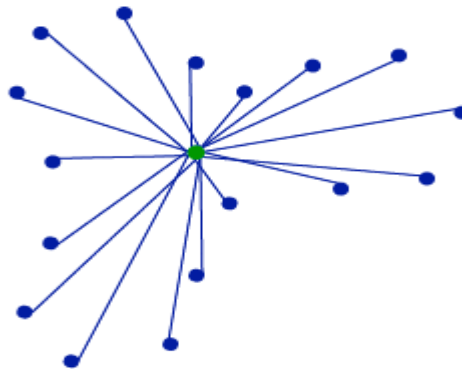


Figure 1-3 : Commande centralisée.

1.3.2 DECENTRALISEE

C'est l'architecture la plus utilisée pour la commande des systèmes multi-robots. Dans cette architecture, l'action de chaque robot est fondée seulement sur la connaissance locale de l'état de ses voisins et de son environnement. Elles nécessitent généralement un flux de communications assez élevé afin de transmettre des requêtes informatives aux autres individus (**Figure 1-4**). Le protocole peut inclure des notions d'intention et d'engagement à partir desquelles chaque robot élabore sa propre trajectoire en prenant en considération les activités des autres robots.

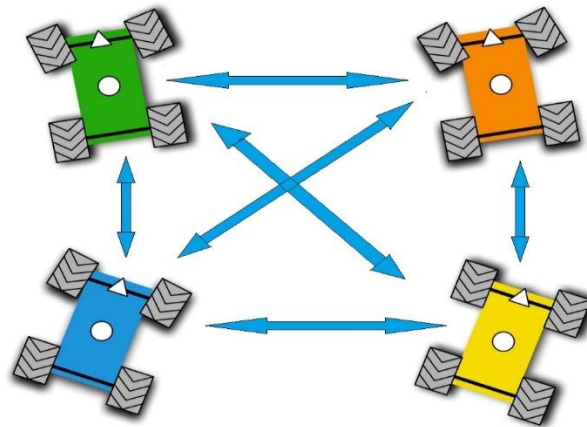


Figure 1-4 : Commande décentralisée.

Les avantages d'une telle stratégie sont multiples : absence de superviseur, diminution des temps de calcul par rapport à une approche centralisée, plus grande robustesse (par exemple une défaillance d'un ou plusieurs robots n'entraîne pas généralement une défaillance de l'ensemble du système). Le prix à payer est bien sûr une incapacité à délivrer une performance optimale puisqu'à chaque instant, chaque robot ne dispose que d'informations limitées et incomplètes sur les autres robots de la flottille en plus, il présente l'inconvénient d'être limité en puissance de calcul. Cela signifie qu'il n'est pas aisé d'implémenter des tâches complexes d'une manière distribuée.

1.3.3 HIERARCHIQUE

Cette architecture est inspirée directement du protocole de commandement militaire est préconisée pour certaines applications. Elle est basée sur l'idée que certains robots peuvent commander, comme des leaders (superviseurs), c'est-à-dire un petit groupe de robots. Une fois encore, comme dans les architectures centralisées, le problème avec cette approche réside dans le cas de la défaillance des superviseurs. **(Figure 1-5)**

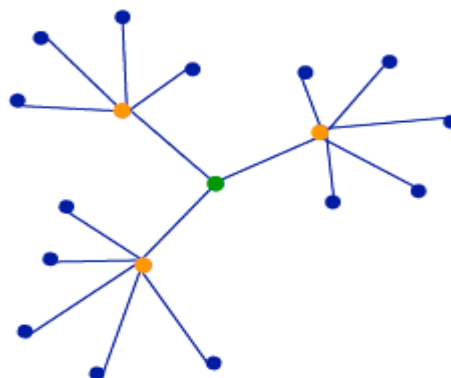


Figure 1-5 : Commande hiérarchique.

1.3.4 HYBRIDE

Cette approche est un compromis entre l'architecture centralisée et l'architecture décentralisée. En particulier, elle est basée sur l'idée que l'un ou plusieurs superviseurs de haut niveau affectent les tâches et les ressources, et les robots de niveau inférieur dans la hiérarchie exploitent les informations locales afin d'accomplir les tâches prédéfinies. Cette architecture hybride a été utilisée dans de nombreuses applications basées sur la commande multi-robots [5].

1.4 STRATEGIE DE COMMANDE

Dans cette section, différentes stratégies de commande et méthodes de représentation de formes sont examinées. Pour la commande de formation de robots mobiles, différentes topologies de commande peuvent être adoptées selon les scénarios et les spécificités de chaque mission. Il peut y avoir un ou plusieurs leaders dans le groupe, tandis que les autres robots suivent un ou plusieurs leaders d'une manière spécifique. Chaque robot est équipé de moyens de détection et de calcul. Dans d'autres applications, les robots sont limités en communication. Généralement, la connaissance globale du système n'est pas disponible pour chaque robot. Une méthode centralisée n'est pas utilisée dans ce cas de figure. De ce fait il est nécessaire de concevoir un contrôleur pour chaque robot en se basant sur les informations locales. S'il n'y a pas de leader, chaque robot doit coordonner ses actions avec les autres en comptant sur un certain consensus global pour réaliser l'objectif commun.

1.4.1 APPROCHES COMPORTEMENTALES ET CHAMPS DE POTENTIELS

Les approches comportementales sont souvent liées aux approches basées sur les champs de potentiels. Ces approches ont été inspirées en observant les phénomènes physiques biologiques. Dans telles approches, plusieurs comportements désirés (évitement des collisions, maintien de la formation, poursuite de cible, etc.) sont définis pour chaque robot de la formation. Chaque comportement correspond à un schéma de réaction élémentaire.

L'action qui va effectivement être appliquée est une moyenne pondérée des vecteurs de réactions élémentaires. Le choix des poids associés à chaque réaction peut s'avérer très complexe et fait appel le plus souvent à l'expertise du concepteur.

Le formalisme et l'analyse mathématique de cette approche sont difficiles et par conséquent la convergence de la formation à une configuration désirée n'est pas garantie.

Dans l'approche comportementale, la commande est distribuée. Le système est évolutif et il n'y a aucun sous-système dont l'utilisation augmente d'une manière significative quand de nouveaux robots sont ajoutés à la formation. L'ajout de nouveaux robots entraîne l'auto-organisation du système.

L'approche comportementale est préconisée pour certaines classes de tâches comme le transport de grande quantité de petits objets, encercler un intrus ou la poursuite des intrus, elle peut être également appliquée à la commande de formation d'avion, la cartographie et l'exploration collaborative.

1.4.2 APPROCHES STRUCTURES VIRTUELLE

Dans l'approche structure virtuelle la formation entière est traitée comme un corps rigide simple. Le concept de la structure virtuelle a été introduit par M.Lewis [6]. L'approche structure virtuelle est typiquement utilisée pour le contrôle de vol en formation des avions et la constellation des petits satellites [7]. La structure virtuelle peut adapter sa forme et s'élargir dans une direction spécifique tout en maintenant une relation géométrique rigide entre les agents. Cette approche a été proposée dans le but d'accroître la précision dans la commande des formations de robots mobiles.

La structure de formation est généralement très serrée et précise dans ces méthodes pendant les tâches. Son inconvénient principal est dans la complexité de calcul.

Dans les approches dites structure virtuelle, la trajectoire désirée n'est pas assignée à chaque robot, mais à la formation entière. Le contrôleur est synthétisé en trois étapes. Premièrement, la dynamique de la structure virtuelle est définie. Ensuite, le mouvement désiré de la structure virtuelle est transposé vers les mouvements désirés pour chacun des agents qui composent la structure. Enfin, des contrôleurs individuels sont dérivés pour le suivi de chaque agent.

Le principal avantage de cette approche c'est qu'il est simple de prescrire le comportement pour le groupe entier. La structure de formation est généralement très serrée et précise dans ces méthodes pendant les tâches. Par contre, son inconvénient principal réside dans la complexité de calcul en plus la nature centralisée de ces approches les rend moins robustes aux échecs.

1.4.3 APPROCHES LEADER-FOLLOWER

La stratégie dite *leader-follower* a été introduite la première fois dans la régulation des systèmes par l'économiste allemand « *Heinrich Freiherr von Stackelberg* ». Ces méthodologies de contrôle sont connues également sous le nom de stratégies de *Stackelberg* qui sont appropriées pour des classes des problèmes de système où il y a de multiples critères, des décideurs multiples et de l'information décentralisée. Dans cette stratégie, les actions de contrôle de suiveur sont basées sur l'état et la commande du leader. Par ailleurs, le concept du leader-follower est couramment employé dans la commande des systèmes multi-robots.

Dans les approches leader-follower, chaque agent robotique est positionné dans la formation par sa géométrie relative par rapport à ses voisins prédéfinis. Chaque robot suit un leader prédéfini en respectant une certaine relation géométrique. En utilisant la relation leader-follower, une forme géométrique de n robots peut être obtenue. En général on a un seul robot leader dans la formation. Le leader ne suit aucun robot dans la formation, mais il suit une trajectoire prédéfinie.

On distingue deux types de contrôleurs pour le maintien d'une formation de plusieurs véhicules :

- Le premier est de type L - ϕ dont l'objectif est de maintenir une distance l et un angle ϕ entre le leader et son follower. (**Figure 1-6 (a)**)
- Le second est de type L - L qui considère la distance relative entre trois robots dont un seulement est le follower des deux autres. (**Figure 1-6 (b)**)

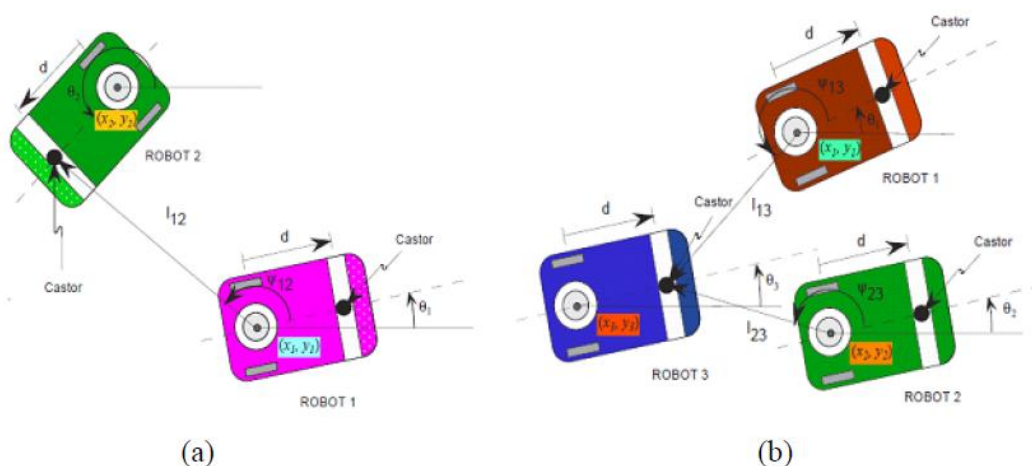


Figure 1-6 : (a) leader follower type L - ϕ , (b) leader follower type L - L.

L'approche leader-follower est plus sûre que celle de la structure virtuelle, car lorsqu'un robot de la formation tombe en panne, le reste de la formation continue l'exécution de la tâche, par contre lorsque le leader tombe en panne c'est toute la formation entière qui échoue. Dans la plupart des méthodes leader-follower, il n'y a pas de retour de l'information, ainsi lorsque les robots suiveurs traînent derrière le leader pour n'importe quelle raison, par exemple des perturbations qui apparaissent dans l'environnement, cet événement n'affecte pas le mouvement du leader, mais la formation sera détruite. Malgré ces insuffisances l'approche leader-follower est particulièrement appréciée dans la littérature en raison de sa simplicité et son évolutivité.

1.4.4 AUTRES APPROCHES

On peut trouver d'autres stratégies de commande de formation faisant appel au contrôle non-linéaire, à la logique floue, aux algorithmes génétiques ou à l'apprentissage par renforcement. Certaines de ces méthodes peuvent venir en complément de solutions plus classiques. Par exemple, l'utilisation de modèles prédictifs permet de pallier l'imperfection des communications entre robots. On peut également signaler les Boids [8], très utilisés dans l'animation par ordinateur, qui permettent de simuler les réactions d'un grand nombre d'individus en utilisant les méthodes comportementales sur des informations très locales. Les résultats sont très proches des réactions naturelles des oiseaux ou des bancs de poissons.

1.5 EVALUATION DES FORMATIONS

1.5.1 AVANTAGES D'UNE FORMATION DE ROBOTS

- Un faible coût pour une couverture plus étendue,
- Une capacité de redondance (si l'un des robots est défaillant en raison d'une panne, d'un blocage, etc. un autre robot peut prendre des mesures pour le dépanner ou le remplacer dans sa tâche)
- La capacité à couvrir une grande surface ont par exemple montré (via une simulation appliquée au cas de l'île de Lampedusa) en 2014 qu'un essaim de 1000 petits drones aquatiques dispersés en mer à partir de 2 bases pourraient en 24 heures faire un bilan de surveillance sur une bande maritime longue de 20 km [9].

1.5.2 INCONVENIENTS D'UNE FORMATION DE ROBOTS

À ce jour, les formations de robots ne peuvent remplir que des tâches relativement simples, ils sont souvent limités par leur besoin en énergie. De manière plus générale, les difficultés d'interopérabilité quand on veut associer des robots de nature et d'origines différentes sont aussi encore très limitantes.

CHAPITRE 2 :

COMMANDE COOPERATIVE D'UNE FORMATION PAR L'APPROCHE STRUCTURE VIRTUELLE

2 COMMANDE COOPERATIVE D'UNE FORMATION PAR L'APPROCHE STRUCTURE VIRTUELLE

2.1 INTRODUCTION

L'un des problèmes les plus importants et fondamentaux pour la commande coopératives des systèmes multi-agent est celui du contrôle coordonné des mouvements. Un type de mouvement coordonné implique le maintien d'une forme géométrique pendant le mouvement.

Par exemple, les applications de Spacecraft où certaines tâches, telles que l'interférométrie laser, exigent que plusieurs instruments, espacés d'un kilomètre l'un de l'autre, maintiennent une géométrie fixe dans 1 cm.

Une façon d'aborder ces problèmes est l'utilisation du concept de structures virtuelles. Dans le mouvement du corps rigide d'un objet physique, tous les points de l'objet maintiennent une relation géométrique fixe via un système de contraintes physiques. Aucune perturbation ne peut être faite à une particule qui ne se propage pas à toutes les particules. Il serait souhaitable que le système robotique puisse se comporter de manière similaire.

Dans cette partie on va présenter une définition du concept structure virtuelle, puis comment utiliser cette approche, structure virtuelle, dans la commande d'une formation de robots mobiles.

2.2 DEFINITION

Considérons un corps rigide où les positions relatives des points sur le corps sont fixées. Lorsque le corps se déplace dans l'espace avec six degrés de liberté, les points sur le corps continuent de maintenir leurs positions relatives, bien que leurs positions dans l'espace changent. On peut dire que le corps rigide est stationnaire par rapport à un cadre de référence. Au fur et à mesure que le cadre de référence se déplace dans l'espace, les points conservent leurs positions par rapport au cadre de référence. Considérons maintenant les robots mobiles dans l'espace. Si les robots maintiennent toujours leurs positions relatives par rapport à un cadre de référence de la même façon que les points sur un corps rigide, on peut penser qu'ils forment une structure rigide qui n'existe pas physiquement. Nous appelons cela une structure virtuelle.

Définition : structure virtuelle est une collection d'éléments, par exemple Robots, qui maintiennent une relation géométrique (semi) rigide l'une avec l'autre et à un cadre de référence [10].

2.3 MOUVEMENT EN FORMATION

Compte tenu d'un certain nombre de robots mobiles, une solution au problème du déplacement en formation doit simultanément satisfaire deux objectifs : progresser dans une direction donnée et maintenir la conformité géométrique à la structure virtuelle imposée en tout temps. La relation géométrique est représentée dans la Figure 2-1.

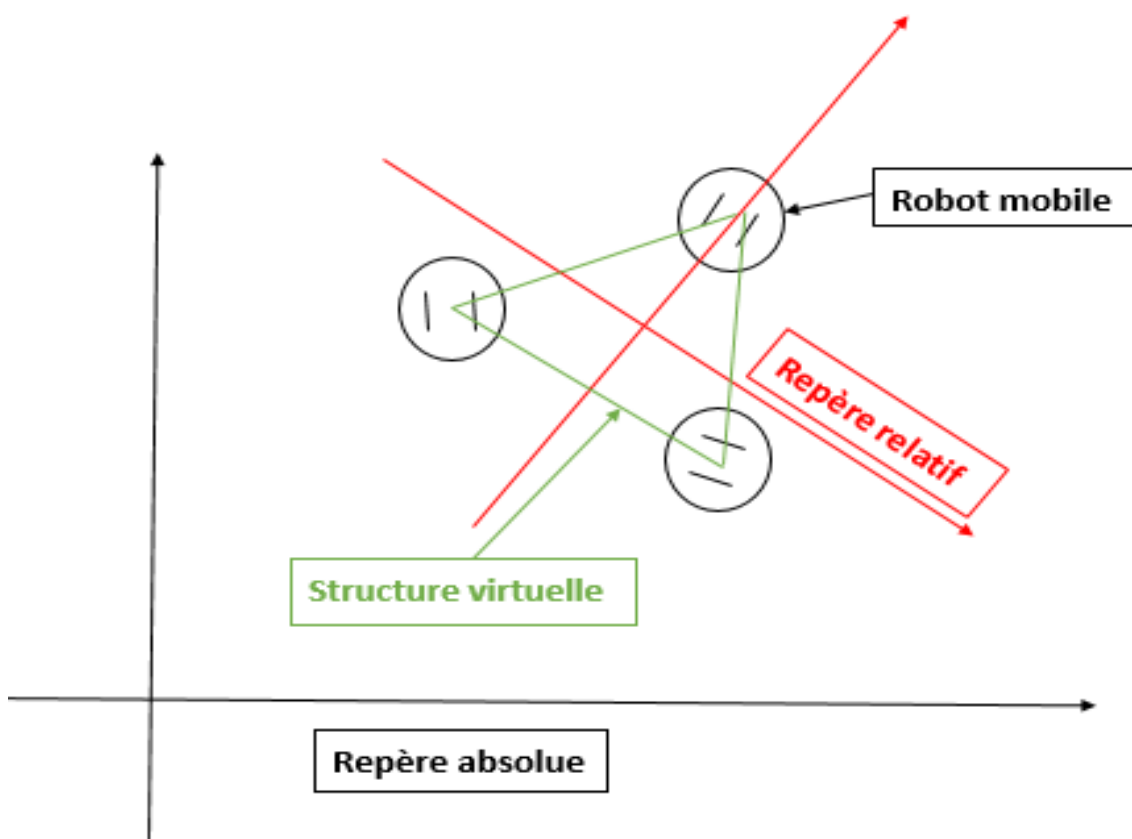


Figure 2-1 : Relations géométriques entre les robots mobiles et la structure virtuelle imposée

Nous adoptons un algorithme non hiérarchique. Autrement dit, il n'y a pas de contrôle strict du contrôle de haut en bas, comme dans les systèmes de contrôle typiques, mais un flux bidirectionnel de contrôle de haut en bas et de bas en haut. Ce concept est illustré à la Figure 2-2. Dans le schéma, on voit que la position de la structure virtuelle est contrôlée par les positions des robots. Simultanément, les positions des robots sont contrôlées par la position de la structure virtuelle. [11]

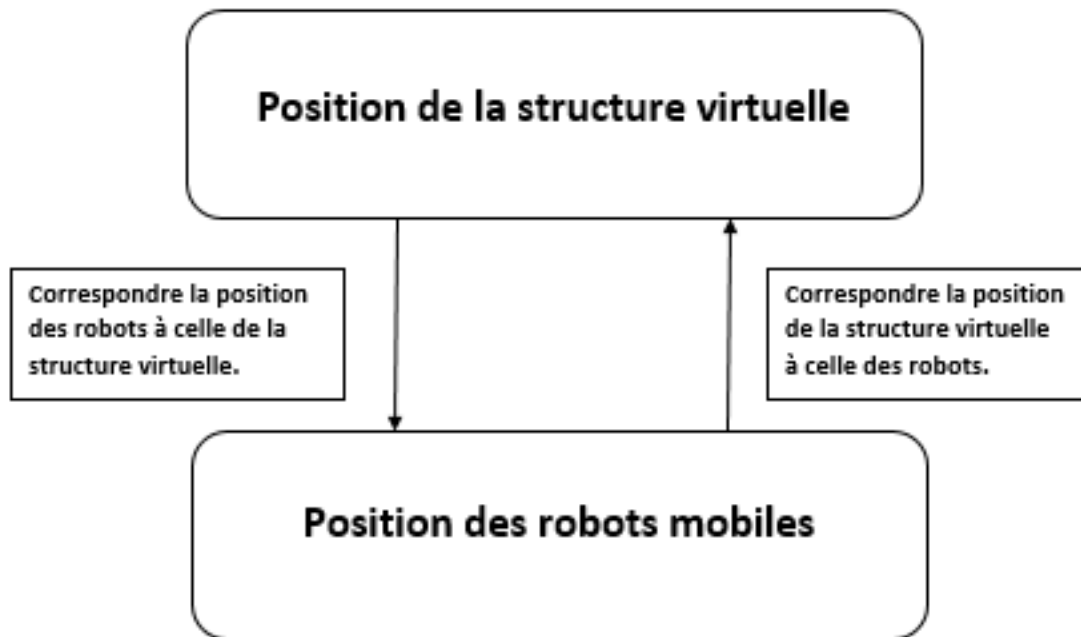


Figure 2-2 : Flux de control bidirectionnel

Si la structure virtuelle est actionnée par une force externe, elle commencera à se déplacer. Les robots, essayant de faire correspondre la structure virtuelle, se déplaceront en formation avec la structure virtuelle. Si un ou plusieurs des robots éprouvent un défaut ou une perte partielle de performance, le robot ne pourra pas parfaitement adapter la structure virtuelle et la position des structures virtuelles sera modifiée. Ces deux éléments, correspondant à la position souhaitée de la structure virtuelle et modifiant la position de la structure virtuelle en fonction de la performance du robot sont les éléments clés de l'algorithme (Figure 2-3).

Etape 1 : Correspondre les robots et la structure virtuelle où nous alignons le structure virtuelle avec les robots mobiles, l'alignement se fait par minimisation de l'erreur entre la structure virtuelle et la position actuelle du robot.

Etape 2 : Déplacer la structure virtuelle par un Δx et un $\Delta \theta$. Cet accroissement est déterminé par un générateur de trajectoire local ou global.

Etape 3 : Calculer les trajectoires désirées des robots pour intercepter le point souhaité de la structure virtuelle.

Etape 4 : Exécution de la commande où on envoie les consignes calculées aux robots.

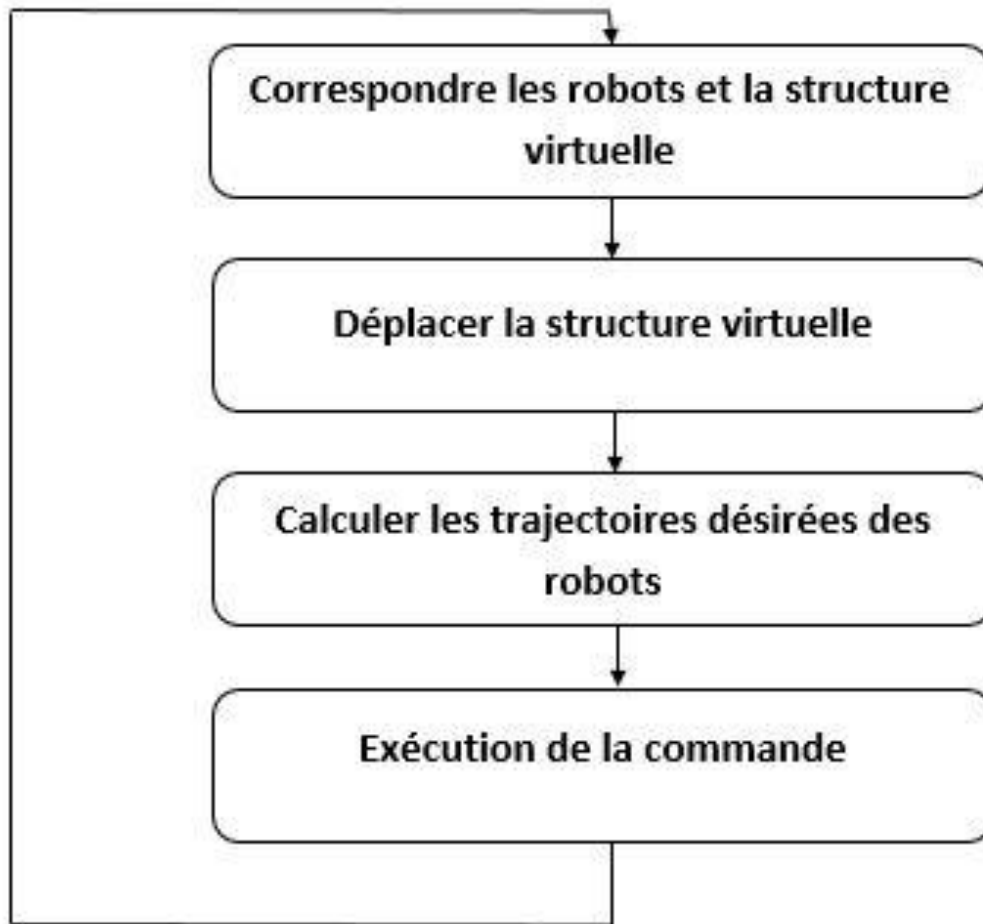


Figure 2-3 : Illustration de l'algorithme de commande par la structure virtuelle

2.3.1 AJUSTER LA FORMATION

Au début d'une itération, la structure virtuelle est alignée avec la position actuelle des robots. Cela équivaut à trouver une translation et une rotation de la structure virtuelle, qui minimise les distances entre les positions de chaque robot et les points de structure virtuelle correspondants.

Un certain nombre de normes de mesures de distance (métriques) peuvent être utilisées. Par exemple :

$$L^1(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.1)$$

$$L^2(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3.2)$$

$$L^\infty(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sup_{i=1 \dots n} d_i \quad (3.3)$$

Où

$$d_i = \text{dist}(\text{Position}_{\text{actuel}}, \text{position}_{\text{désiré}}) \quad (3.4)$$

La position désiré est gènère à partir de la position actuel en faisant une translation suivit d'une rotation.

On va utiliser les normes L^2 et L^∞ , L^2 a comme interprétation la somme d'erreur de tous les robots à partir de leurs points souhaités dans la structure virtuelle. L^∞ peut être interpréter comme le temps nécessaire pour que les robots converge vers ses position dans la formation.

La fonction de coût minimisée est sous la forme :

$$G(I) = L^n \quad (3.5)$$

Le but est d'obtenir I le vecteur du mouvement qui minimise l'équation (3.5) [12].

2.3.2 TRAJECTOIRE DE LA STRUCTURE VIRTUELLE

Dans la deuxième phase de chaque itération, la structure virtuelle est déplacée dans la direction de mouvement souhaitée. Le déplacement s'effectue en faisant une translation et une rotation à la position de la structure virtuelle actuelle « P_{act} » pour obtenir une position souhaitée de la structure virtuelle dans le prochain pas de temps. Cette position « P_{de} » est calculé comme ça :

$$[P_{\text{des}}] = \text{trans}(\Delta x). \text{rot}(\Delta \theta). [P_{\text{act}}] \quad (3.6)$$

2.3.3 TRAJECTOIRE DU ROBOT MOBILE

Le robot mobile est considéré comme élément externe à l'algorithme. Donc on utilise la position désiré du robot mobile dans la formation comme consigne de modèle du robot mobile, où il est supposé capable d'atteindre cette position dans un temps inférieur au temps de chaque itération de l'algorithme, pour générer la vitesse de translation V et la vitesse de rotation W .

2.4 RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette partie on va présenter les résultats de simulation de l'approche structure virtuelle dans le cas de suivi de trajectoire.

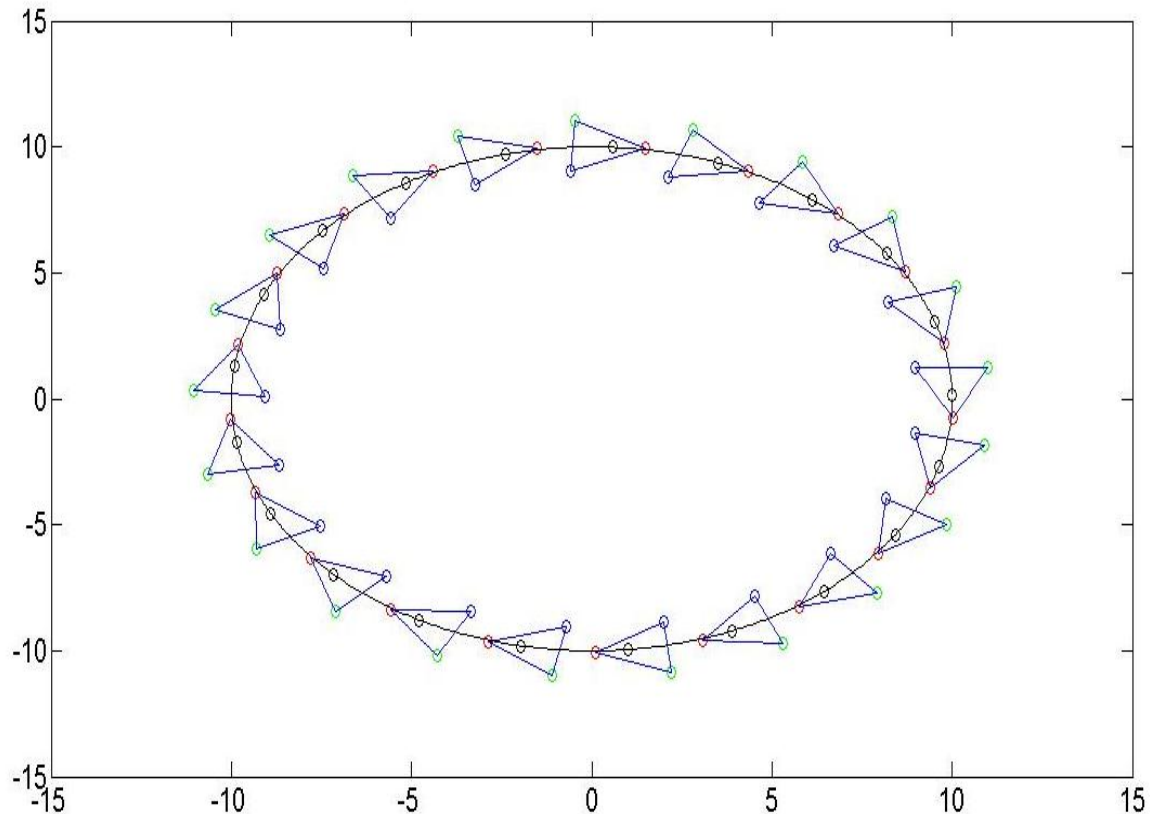


Figure 2-4 : Suivi d'une trajectoire circulaire en utilisant l'approche structure virtuelle

La Figure 2-4 montre les résultats de simulation dans le cas de suivi d'une trajectoire circulaire, où la forme de la structure virtuelle est tracé en bleu (triangle) chaque 30 itération pour bien illustrer la rigidité de la structure. Le cercle noir (à l'intérieur du triangle) représente le centre de la structure qui suit la trajectoire circulaire, les trois cercles en rouge, vert et bleu représentent les positions désirées des robots mobiles dans la formation.

2.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques travaux concernant l'application de l'approche structure virtuelle dans la commande coopérative d'une formation de robots mobiles.

Au début, on a définie c'est quoi une structure virtuelle et comment utiliser ce concept dans la commande d'une formation de robots mobiles, puis nous avons présenté

les résultats de simulation de fonctionnement de cette approche. On a remarqué que contrairement à de nombreuses stratégies de contrôle de la robotique coopérative, cette solution ne repose pas sur l'existence d'un leader parmi les robots. Cela augmente la tolérance aux pannes et évite l'élection du leader, ce qui constitue un problème difficile dans les algorithmes distribués. Aussi, comme l'algorithme ne repose pas sur des propriétés particulières de primitives géométriques telles que des cercles ou des lignes droites, la même méthode peut être appliquée à des structures virtuelles de différentes formes sans aucune modification.

CONCLUSION GENERALE

3 CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé répond à la volonté d'étudier les architectures de commande des systèmes multi-robots mobiles. L'intérêt est porté plus particulièrement sur la coopération des entités robotiques autonomes dans le but de réaliser des tâches spécifiques, Il consiste en premier lieu, à faire l'étude et la commande d'une formation de robots mobiles avec les approches développées dans la littérature pour les systèmes multi-robots, puis faire coopérer leurs actions pour aboutir à un but ou un objectif global du groupe.

Un système multi-robots évoque un certain nombre de problèmes qui n'apparaissent pas dans le cas mono-robot. En effet, la commande de formation de robots mobiles constitue une matière intéressante à l'étude. On s'est intéressé au problème de suivi de trajectoire en maintenant une certaine géométrie de la formation.

Dans le premier chapitre nous avons présenté une introduction des systèmes multi-robots et la commande d'une formation de robots mobiles où le mot formation veut dire que le groupe de véhicules se déplace d'une manière ordonnée selon une configuration géométrique prédéfinie, ensuite nous avons cité les architectures et les approches de commande à savoir l'approche comportementales, l'approche leader-follower et l'approche structure virtuelle.

Le deuxième chapitre est scindé en deux parties : la première partie a été consacrée à la présentation de travail qui concerne la commande coopérative par structure virtuelle appliquée pour la commande d'une formation de robots mobiles. La deuxième partie a été consacrée à présenter les résultats de simulation.

La structure virtuelle est une méthode extensible et efficace pour le contrôle multiple du mouvement du robot mobile est proposée. Bien qu'elle n'ait été testée qu'en 2 D, il n'y a pas de limitation inhérente à son application au contrôle de mouvement dans un espace 3 D. Il existe plusieurs directions dans lesquelles cette méthode peut être étendue, y compris des structures virtuelles souples / déformables, des structures virtuelles hiérarchiques. Les structures virtuelles peuvent également être appliquées immédiatement à de nombreux problèmes de contrôle de mouvement.

BIBLIOGRAPHIE

- 1] G.Dudek, «A taxonomy for multi-agent robotics,» *Autonomous Robots 3*, pp. 375-397, 1996.
- 2] G.HATTENBERGER, «Vol en formation sans formation contrôle et planification pour le vol en formation des avions sans pilote,» chez *Thèse de doctorat*, France, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- 3] H. Tanner, G. Pappas et V. Kumer, «Leader-to-Formation Stability,» 2004.
- 4] Don Grundel, Robert Murphey, Panos Pardalos et Oleg Prokopyer, «Cooperative Systemes : Control and Optimisation,» 2007.
- 5] Jacobsen, «A generic architecture for hybrid intelligent systems,» *IEEE World Congress on Computational Intelligence* , pp. 709-714, 1998.
- 6] K. e. M.Lewis, «High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures,» *Autonomous Robots* , pp. 387-403, 1997.
- 7] R. Beard, «Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure,» 2004, pp. 73-82.
- 8] C. Reynolds, «Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,» *In Computer Graphics* , pp. 25-34, 1987.
- 9] Duarte, «Evolution of collective behaviors for a real swarm of aquatic surface robots,» 2014.
- 10] M. A. L. Kar-Han Tan, «Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control,» chez *Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96*, Los Angeles, 1996.
- 11] N. v. d. W. H. N. Thijs H.A. van den Broek, «Formation Control of Unicycle Mobile Robots: a Virtual Structure Approach,» chez *Joint 48 IEEE Conference on Decision and Control and 28 Chinese Control Conference*, Shanghai, 2009.

S. A. T. W. T. V. a. B. P. .. F. W. H. Press, Numerical Recipes in C: The Art of
12] Scientific Computing, New York: Cambridge University Press, 1995.