



HAL
open science

Stratégie de commande collaborative pour des réseaux de robots

Philippe Fraise, Arturo Gil-Pinto, René Zapata, Wilfrid Perruquetti, Thierry
Divoux

► **To cite this version:**

Philippe Fraise, Arturo Gil-Pinto, René Zapata, Wilfrid Perruquetti, Thierry Divoux. Stratégie de commande collaborative pour des réseaux de robots. 5e Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR 2005, Oct 2005, Guidel, France. lirmm-00106419

HAL Id: lirmm-00106419

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00106419v1>

Submitted on 26 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Stratégie de commande collaborative réactive pour des réseaux de robots

P. Fraise¹
A.P. Gil¹
R. Zapata¹

W. Perruquetti²
T. Divoux³

¹ LIRMM CNRS UMR 5506

² LAGIS CNRS UMR 8021

³ CRAN CNRS UMR 7039

161 rue ADA, 34392 Montpellier cedex 5
Philippe.Fraise@lirmm.fr

Résumé

Ces travaux font l'objet d'une étude concernant l'élaboration d'une stratégie de commande décentralisée réactive pour une flottille de robots mobiles terrestres. Cette stratégie de commande est basée sur un contrôle décentralisé qui s'appuie sur le principe Leader-Follower utilisant à la fois des informations de positionnement absolu (GPS) et relatif entre véhicule (niveau de réception des liens WiFi) ainsi que des informations d'existence d'obstacles de proximité (capteurs ultra-sons). Cette méthode permet d'intégrer et d'optimiser à chaque instant ces diverses contraintes afin de générer un chemin faisable capable de maintenir la flottille dans une forme géométrique donnée, avec un niveau de réception des transmissions entre les véhicules minimal, ainsi que l'évitement local d'obstacles.

Mots Clef

Commande collaborative, systèmes plats, génération de trajectoire, commande décentralisée

1 Introduction

Les systèmes multi-robots est un champ important de la recherche robotique car il ouvre des perspectives très importantes dans les domaines de l'exploration ou des missions de recherche et de secours des personnes. En effet, ces types de missions nécessitent de couvrir un espace conséquent d'une zone déterminée. Pour ce faire, le partage d'informations capteurs tels que la localisation de l'ensemble des véhicules ainsi que des retours vidéo ou sonore vers un opérateur distant assurent une couverture rapide et optimale de la recherche. D'autres types de missions collaboratives ont déjà été envisagées tels que le transport coopératif [1] ou le jeu d'équipe [2]. Pour réaliser ces tâches, différentes techniques coopératives du contrôle décentralisé au comportement inspiré du vivant ont déjà été abordées. Dans la plupart des cas, ces techniques s'appuient sur l'utilisation de capteurs de positionnement relatif et/ou absolu

(vision, GPS, capteurs proprioceptifs...), dont le partage des informations s'effectue par l'utilisation de moyen de transmissions sans fil.

Notre travail de recherche s'est focalisé sur l'étude et le développement d'une stratégie de commande capable de maintenir une flottille de véhicules terrestres en formation avec une contrainte de maintien des liens de transmission entre véhicules, quelle que soit la structure de l'environnement (bâtiment, mur, obstacle). En effet, la force et l'efficacité d'une flottille de robots est dans le partage des informations ainsi que le déplacement coordonné permanent et réactif. Ces contraintes maintenues, on peut envisager la téléopération de la flottille par un opérateur distant (cf. figure (1)).

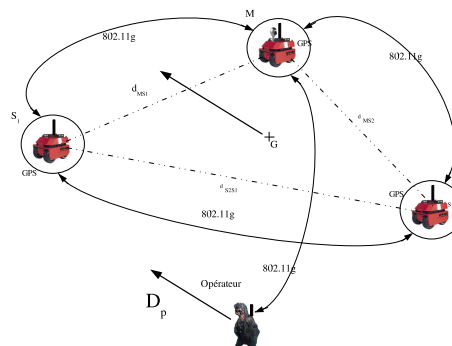


FIG. 1 – Flottille de robots mobiles

La stratégie de commande que nous avons développée est basée sur le principe d'une commande décentralisée déjà proposée dans [3]. Cependant le déploiement d'une flottille de robots d'extérieur dans des environnements urbains par exemple, peut engendrer des difficultés d'une part de localisation avec le GPS et d'autre part de coupure des liens de communications entre véhicules. Aussi avons-nous choisi d'utiliser le dispositif de transmission sans fil (WiFi) en tant que capteur, nous permettant ainsi de mesurer le niveau

de réception du lien de transmission avec son voisin immédiat. Cette nouvelle variable de commande associée à l'évitement local de collision, va nous contraindre d'élaborer un schéma de commande adapté capable de gérer à la fois le positionnement absolu et relatif des véhicules, le niveau de réception des transmissions entre véhicules et l'évitement de collision.

Ce projet nécessite des compétences dans les domaines de la commande, de la robotique mais aussi des réseaux et de la qualité de services sur les réseaux sans fil. Aussi avons-nous créé un projet de collaboration avec deux autres équipes de recherche afin d'adresser la globalité du problème. Ce papier consacre cependant l'essentiel de sa présentation aux résultats concernant le domaine de la robotique.

2 Stratégie de commande décentralisée

2.1 Introduction

La stratégie de commande décentralisée est basée sur le modèle Leader-Follower (cf. figure (2)). Au début de la mission le véhicule le plus proche de l'opérateur est choisi arbitrairement comme leader de la flottille. Les autres véhicules

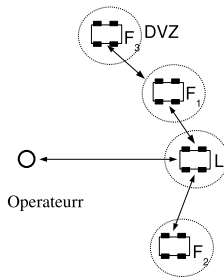


FIG. 2 – Stratégie de commande décentralisée

sont les followers. La position désirée du leader est définie par la position courante de l'opérateur augmentée d'une distance d_{ol} qui peut être constante ou variable. Les positions désirées des followers sont définies par la position courante du voisin immédiatement supérieur (plus proche du premier leader), augmentée d'une distance d_{fifj} (distance entre le suiveur i et j).

Si cette configuration est respectée, alors les véhicules vont suivre le déplacement de l'opérateur (cf. figure (2)) à condition que chaque véhicule ait accès à chaque instant à la position de son voisin immédiat. Dans ce cas de figure, l'opérateur pourra disposer d'un retour d'informations capteurs de l'ensemble de la flottille (vidéo par exemple).

2.2 Positionnement Leader-Follower

La détermination des positions désirées des véhicules pour chacun des robots qui constitue la flottille, se déduit des informations de positionnement absolu (GPS) courantes de chacun des véhicules x_i, y_i , associées à la connaissance de

l'angle relatif ψ_i entre le leader et follower local mesuré par une antenne sectorielle motorisée pointant le niveau de réception maximal du véhicule voisin immédiat (cf. figure (3)). En utilisant l'ensemble de ces informations, on peut

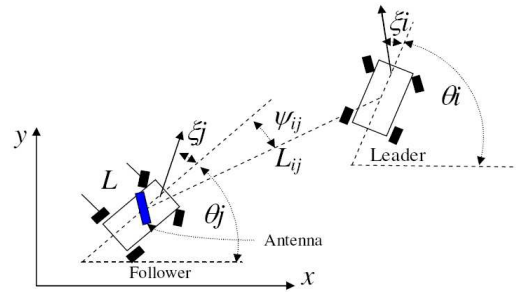


FIG. 3 – Positionnement Leader-Follower

écrire les équations du positionnement tel que :

$$\begin{cases} x_j^d = x_i - L_{ij}^d \cos(\theta_j + \psi_{ij}) \\ y_j^d = y_i - L_{ij}^d \sin(\theta_j + \psi_{ij}) \\ \theta_j^d = \frac{y_j^d - y_i}{x_i^d - x_i} \\ \xi_i^d = \theta_j^d - \theta_j \end{cases} \quad (1)$$

Avec L_{ij}^d qui représente la distance désirée entre le véhicule i et j , ψ l'angle entre les deux véhicules et θ l'orientation relative du véhicule. La position du premier leader est définie directement par l'opérateur.

3 Positionnement avec le niveau de réception

Pour assurer le maintien du lien de communication, il est nécessaire d'introduire une nouvelle variable de commande qui est le niveau de réception du dispositif (WiFi) qui s'exprime en dBm. On considère que les véhicules sont munis de deux dispositifs WiFi. Le premier muni d'une an-

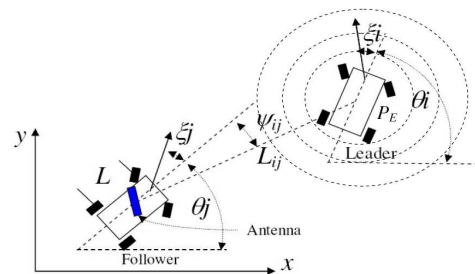


FIG. 4 – Positionnement Leader-Follower

tenne omnidirectionnelle permettant d'envoyer à son ou ses follower(s), sa position courante et le deuxième muni d'une antenne sectorielle motorisée capable de suivre et de mesurer le niveau de réception concernant la transmission de son leader local (cf. figure (4)). Cette nouvelle variable de

commande qui représente une puissance de réception peut s'exprimer en fonction de la distance entre les véhicules :

$$P_{jd}Bm = 10\log_{10}\frac{P_j}{10^{-3}} = 10\log_{10}\frac{P_{ei}}{4\pi L_{ij}^2} \quad (2)$$

Avec P_j la puissance de réception mesurée sur le véhicule j , P_{ei} la puissance d'émission du véhicule i .

4 Evitement de collision

La dernière contrainte que nous souhaitons inclure dans cette stratégie de commande est l'évitement de collision. Cet évitement de collision est basé sur une zone déformable entourant et protégeant le robot à partir d'informations de capteurs de proximité (ultra-sons). Pour un robot mobile cette zone virtuelle déformable (cf. figure (5)), [9], sera paramétrable en fonction de la vitesse du véhicule et des connaissances éventuelles de l'environnement dans lequel il évoluera. Lorsqu'un obstacle va pénétrer dans l'environnement, une déformation va apparaître dans la zone qui sera directement propagée vers le contrôleur avec pour objectif de restituer la forme initiale. On peut comparer cet algorithme à un jeu à deux joueurs où le premier qui est l'environnement va créer des déformations non désirées et le deuxième, le contrôleur du robot, va essayer de reconstruire la forme initiale. Cette déformation peut-être écrite

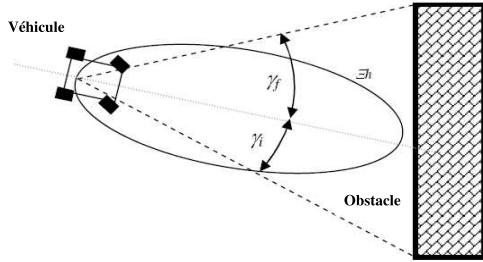


FIG. 5 – Zone virtuelle déformable

par l'équation suivante :

$$\Delta = \Xi - \Xi_h = \beta(I) - \rho(U_{dvz}) \quad (3)$$

Avec $\Xi = \beta(I)$ qui dépend de l'information de proximité I et $\Xi_h = \rho(U_{dvz})$ représente la part de la déformation commandée par le robot. Par différentiation de l'équation (3) par rapport au temps, nous obtenons :

$$\dot{\Delta} = -\nabla_{\pi}[\rho] \phi + \nabla_I[\beta] \psi \quad (4)$$

Avec $\nabla_{\xi}[\cdot]$ est l'opérateur dérivé par rapport aux variables ξ et $\psi = \dot{I}$:

$$\phi = \dot{U}_{dvz} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{v_j} \\ \dot{U}_{\omega_j} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Cette équation peut être écrite :

$$\dot{\Delta} = A\phi + B\psi \quad (6)$$

Les variations de Δ sont contrôlées par le vecteur d'entrée $u = [\phi \ \psi]^T$. Le premier vecteur ϕ , envoyé au contrôleur tend à minimiser la déformation de la DVZ. Le second, ψ , est inconnu et induit par l'environnement.

Une fois l'équation (6) obtenue, son intégration peut être calculée en quatre étapes :

1. Calcul de l'information d'intrusion I par mesure de la distance dans les s directions données par les capteurs de proximité.
2. Choix de la variation désirée de cette déformation comme une fonction de la déformation réelle et de ses dérivées :

$$\dot{\Delta}_{des} = -K_{prop}\Delta - K_{der}\dot{\Delta} \quad (7)$$

Avec K_{prop} et K_{der} choisis à partir d'une heuristique.

3. Calcul du vecteur de contrôle $\check{\phi}$ à l'instant t obtenu par l'inversion de l'équation (6) après avoir remplacé la dérivée de la déformation par sa valeur désirée $\dot{\Delta}_{des}$:

$$\check{\phi} = A^{\dagger}(\dot{\Delta}_{des} - B\hat{\psi}) \quad (8)$$

Avec A^{\dagger} la fonction inverse (pseudo-inverse) de la fonction linéaire A et $B\hat{\psi}$ une estimation du second vecteur de commande ψ à l'instant t obtenu à $(t-1)$:

$$B\hat{\psi}(t) = \dot{\Delta}_{measured}(t-1) - A\phi(t-1) \quad (9)$$

4. Intégration de $\check{\phi}$ afin d'obtenir le vecteur de commande : $U_{dvz} = \int_t^{t+dt} \check{\phi} dt$

5 Génération de trajectoire réactive

La commande de la flottille de robots mobiles doit être compatible avec l'ensemble des contraintes énoncées ci-dessus en incluant de plus la contrainte de non-holonomie de chacun des véhicules et les saturations des actionneurs de chaque véhicule. En effet, si un véhicule pendant le déplacement de la formation a un de ses actionneurs qui atteint la saturation en vitesse ou en direction, on aura inévitablement un comportement en boucle ouverte qui risquera de fragiliser la formation voire de la détruire. Aussi est-il indispensable de prendre en compte cette contrainte.

5.1 Modélisation et sorties plates

Le modèle dynamique d'un véhicule de type électrique peut s'écrire :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\xi}(t) \\ \dot{v}(t) \\ \dot{w}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\theta) \\ v \sin(\theta) \\ \frac{v}{L} \tan(\xi) \\ w \\ -\frac{v}{\tau_v} + \frac{U_v}{\tau_v R} \\ -\frac{w}{\tau_w} + \frac{U_w}{\tau_w R} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Avec v la vitesse linéaire du véhicule, w la vitesse angulaire de la direction, τ_v et τ_w respectivement les constantes de temps des actionneurs, U le vecteur de commande des

actionneurs et R le rayon des roues. En considérant le vecteur de sortie $z = \{x, y\}$ et ses dérivées, on obtient :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y'}{x'} \quad (11)$$

$$v = \sqrt{(x')^2 + (y')^2} \quad (12)$$

$$\xi = \tan^{-1} L \frac{(x' y'' - x'' y')}{(\sqrt[3]{(x')^2 + (y')^2})} \quad (13)$$

$$w = \frac{(-3(x' y'' - x'' y')(x' x'' + y' y'') + v^2(x' y^{(3)} - x^{(3)} y'))v}{v^6 + ((x' y'' - x'' y')L)^2} \quad (14)$$

$$U_v = \frac{\tau_v 2(x' x'' + y' y'') + (x')^2 + (y')^2}{R \sqrt{(x')^2 + (y')^2}} \quad (15)$$

$$U_w = (\tau_w w' + w) \quad (16)$$

Cet ensemble de sortie z sont les sorties plates du système [11]. Cette représentation du modèle dynamique du robot en fonction de ses sorties plates va permettre de réaliser une paramétrisation d'une trajectoire basée sur des B-Splines. Cette génération pourra prendre en compte des contraintes telle que la saturation des actionneurs par exemple.

5.2 Paramétrisation et optimisation des trajectoires

Les sorties plates du véhicule sont paramétrisées par l'utilisation de B-Splines. Le problème d'optimisation peut être formalisé pour chaque robot par la minimisation en temps optimal de la fonctionnelle suivante :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (17)$$

avec t_0 le temps initial ou courant et t_f le temps final inconnu. Les trajectoires doivent atteindre l'état final $x(t_0)$ et $x(t_f)$ et doivent satisfaire les contraintes suivantes :

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U} \leq \mathbf{U}_{\max} \quad (18)$$

$$\xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (19)$$

Le problème peut s'écrire à nouveau :

$$\min \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (20)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{f}_U(\mathbf{z}(t), \mathbf{z}'(t), \dots, \mathbf{z}^P(t)) \leq \mathbf{U}_{\max} \quad (21)$$

$$\xi_{\min} \leq \mathbf{f}_\xi(\mathbf{z}(t), \mathbf{z}'(t), \dots, \mathbf{z}^P(t)) \leq \xi_{\max} \quad (22)$$

Ce problème optimal est modifié en un problème de programmation non linéaire et peut être résolu par une méthode du gradient utilisant la méthode de type quasi-Newton

[10]. Nous proposons la prise en compte de l'évitement de collision par une modification de l'index de performance, équation (17), en ajoutant le terme ψ_s à cet index. L'objectif de cette méthode est que chaque robot trouvera une trajectoire à temps optimal qui permet de rejoindre l'état désiré en minimisant la déformation de la zone virtuelle déformable. Le traitement de ces interactions et de ces différentes contraintes va assurer l'obtention d'une trajectoire assurant le suivi du leader avec évitement des obstacles sans saturation des actionneurs. Cette nouvelle fonction permet ainsi de créer une génération de trajectoire réactive capable de se modifier en ligne à chaque détection d'obstacle.

5.3 Configuration de la commande

L'inclusion de la génération de trajectoire réactive dans un schéma de commande d'un véhicule est réalisée figure (6). Cette configuration assure à chaque véhicule la construc-

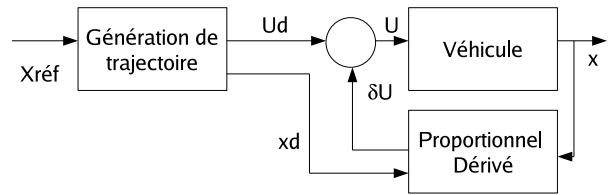


FIG. 6 – Schéma de commande

tion d'une trajectoire optimale à partir de son état courant vers son état désiré au moyen des sorties plates. Un contrôle linéaire de type proportionnel dérivé est ajouté afin de compenser les erreurs de modélisation du véhicule ainsi que des contacts roue-sol qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

6 Résultats de simulation

Nous avons réalisé un simulateur incluant le modèle dynamique des véhicules ainsi que la contrainte de non-holonomie. Les paramètres du modèle dynamique ont été identifiés à partir du site expérimental que nous avons développé qui comprend trois véhicules électriques incluant quatre capteurs de proximité ainsi que deux émetteurs récepteur WiFi (cf. figure (7)).

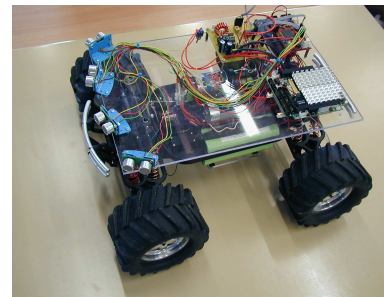


FIG. 7 – Site expérimental

6.1 Validation de la commande décentralisée

Cette première validation a pour objectif le suivi du leader sans obstacle avec la contrainte de distance entre les véhicules. La figure (8) présente trois véhicules, un leader dont la trajectoire est prédéfinie par l'opérateur et deux followers qui suivent à une distance de 10m le leader. Le cercle autour du leader indique un niveau de réception de -5dBm que le follower 1 devra suivre au milieu de la trajectoire pendant un certain temps car la position courante du leader ne sera plus, à ce moment là, disponible.

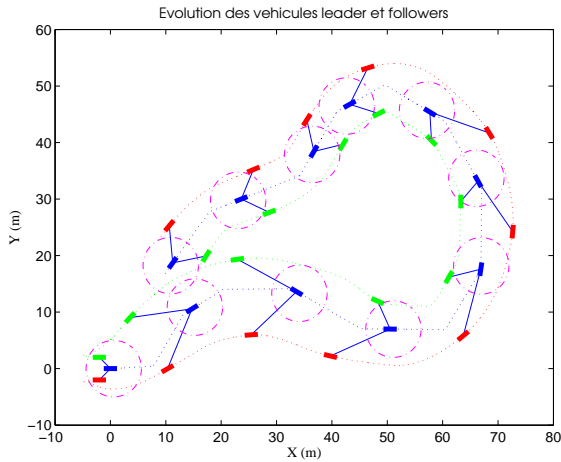


FIG. 8 – Trajectoires leader et 2 followers

Ce suivi s'effectue sans génération de trajectoire avec simplement la loi de commande proportionnelle-dérivée soit en position soit en niveau de réception.

La figure (9) représente une formation de cinq véhicules avec une distance entre les véhicules cette fois-ci de 100m. Le niveau de réception désiré pour les followers 1 et 2 se situe à -25dBm. La position courante du leader n'est plus disponible durant le virage, la commutation sur le niveau de réception s'effectue pendant cette phase. Il est intéressant

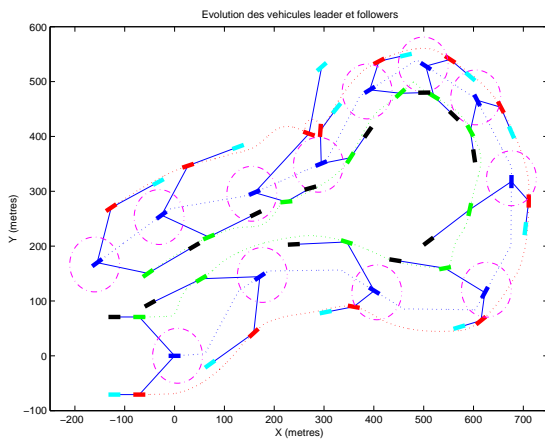


FIG. 9 – Trajectoires leader et 4 followers

de souligner que le maintien d'une formation lorsque les distances entre véhicules deviennent importantes (>50m) induit lors de manœuvres des déformations de la formation qui sont liées d'une part aux contraintes de non-holonomies des véhicules et d'autre part à la saturation des actionneurs (vitesse et direction). Il est donc nécessaire, en conclusion, d'utiliser même dans le cas sans obstacle une génération de trajectoire afin de gérer les erreurs de poursuite.

6.2 Validation de l'algorithme de génération de trajectoire réactive

Cette simulation a pour objectif de visualiser les effets de la génération de trajectoire réactive sur une formation minimale de deux robots en présence d'un obstacle. La trajectoire du leader est supposée définie par l'opérateur, la trajectoire désirée du follower est définie figure (10).

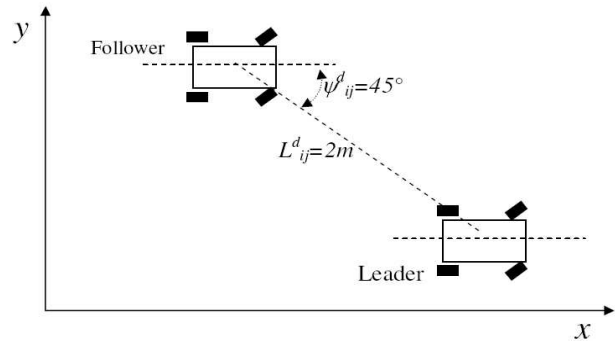


FIG. 10 – Formation diagonale

La première simulation figure (11), présente un suivi du leader avec un obstacle sur la trajectoire du follower. On peut distinguer sur cette figure l'ensemble des trajectoires calculées et réactualisées à chaque période d'échantillonnage en fonction des informations des capteurs de proximité qui ont une distance de détection de 10m environ. Après l'évitement de l'obstacle le follower reprend sa position initiale.

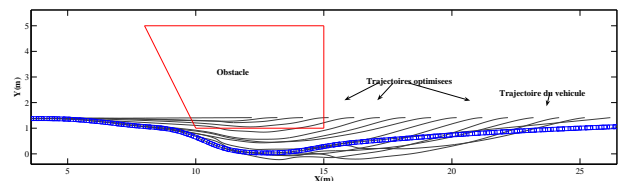


FIG. 11 – Trajectoire du follower

La simulation suivante figure (12), propose une condition initiale de démarrage différente de la précédente, avec une position du follower inversée suivie de la rencontre d'un obstacle. Cette contrainte extrêmement forte montre la souplesse de cette méthode réactive.

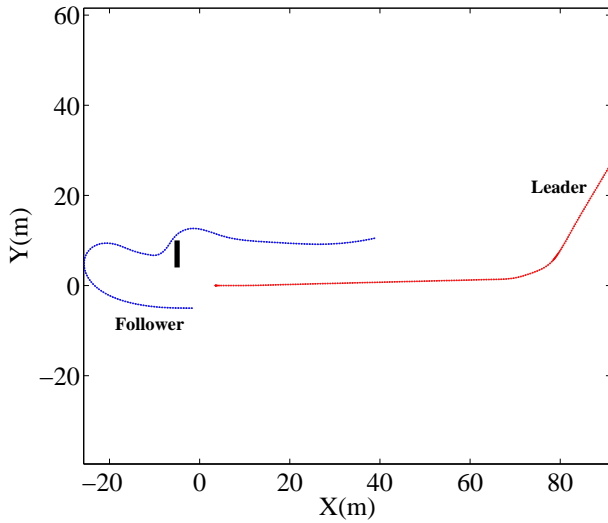


FIG. 12 – Trajectoires leader et follower

Enfin, la dernière simulation figure (13), propose d’insérer sur la trajectoire du follower un obstacle de grande dimension par rapport à la capacité de détection des capteurs de proximité.

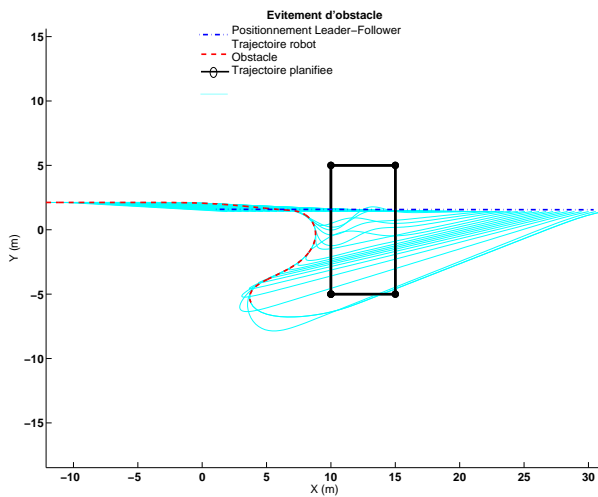


FIG. 13 – Evitement d’obstacle sous contraintes

L’ensemble des trajectoires calculées en ligne sont présentes sur la courbe et montre de quelle manière le véhicule adapte son mouvement à la présence de l’obstacle tout en conservant l’objectif final de suivi du leader.

7 Perspectives

Ce projet réalisé conjointement en collaboration avec le LAGIS et le CRAN au sein d’un groupe de recherche sur la commande collaborative de véhicules mobiles comprend

d’autres aspects de recherche très importants nécessaires à son succès. En effet, la commande d’une flottille de robots mobiles est construite sur l’hypothèse que les liens de communications entre les véhicules sont parfaits et n’engendrent aucun problème pouvant nuire au succès de la mission.

La réalité expérimentale est très différente. La qualité de service (QoS) sur les liaisons de transmissions sans fil ne peut être assurée de part la nature même du médium de communication. Considérant ce fait, il est important de modéliser et identifier ces phénomènes perturbateurs pour la commande afin de construire un contrôleur adapté. L’équipe du CRAN a développé un outil de métrologie des réseaux [7] capable d’effectuer des mesures et des estimations en temps réel des retards de transmission aller et retour ainsi que des taux de pertes des paquets. Cet outil permet ainsi d’avoir une observation et une prédiction sur les retards moyens et instantanés des transmissions entre les véhicules. Ces retards quelquefois très importants (5ms à 1,5s avec WiFi) exigent à la fois une prise en compte au niveau de la commande mais aussi dans le mécanisme de transmission (protocole adapté).

C’est pour cela que le LAGIS, fort de son expérience dans la commande des systèmes à retards a développé des techniques de commande capables de prendre en compte ces variations de retards [5], [6] dans la boucle globale de la commande constituée par la flottille de robots mobiles et l’opérateur distant. Les perspectives, sont à moyen terme la proposition d’un algorithme de commande collaboratif global prenant en compte à la fois les contraintes liées aux véhicules mais aussi celles des retards de transmission.

8 Conclusions

Nous avons proposé une nouvelle méthode de génération de trajectoire réactive capable de prendre en compte un ensemble de contraintes différentes et parfois antagonistes. Les résultats que nous avons obtenus sont extrêmement encourageants. La prise en compte du niveau de réception radio en tant que variable de commande de la flottille afin de maintenir le lien de communication intact quels que soient les obstacles rencontrés, est un point important qui doit être approfondi par la prise en compte d’un modèle de rayonnement des antennes non isotrope. Une étude de modélisation et de commande globale comprenant à la fois les liens de communications et les robots mobiles va constituer, dans les années qui viennent, un défi scientifique important pour la commande de flottille de robots mobiles terrestres.

Dans la continuité, on pourra citer le domaine exploratoire que constitue la commande collaborative réactive de robots mobiles sous-marins (AUV) où les problèmes rencontrés en termes de commande, de génération de trajectoires ainsi que de retards de transmission sont bien plus complexes à traiter et commence à faire l’objet d’un certain intérêt [8].

Références

- [1] K. Kosuge, T. Oosumi, M. Satou, K. Chiba, K. Takeo, "Transportation of a single object by two decentralized-controlled nonholonomic mobile robots", in Proc. Conf. Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 1998, pp. 2989-2994.
- [2] T. Weigel, J. Gutmann, M. Dietl, A. Kleiner, B. Nebel, "CS Freiburg : Coordinating Robots for Successful Soccer Playing, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Special Issue on Advances in Multirobot Systems, Vol. 18, N5, October 2002, pp. 685-699.
- [3] J.T. Feddela, C. Lewis, D.A. Schoenwald, "Decentralized Control of Cooperative Robotic Vehicles : Theory and Application", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Special Issue on Advances in Multirobot Systems, Vol. 18, N5, October 2002, pp. 852-863.
- [4] A.K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Speltzer, C. J. Taylor, "A Vision-Based Formation Control Framework", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Special Issue on Advances in Multirobot Systems, Vol. 18, N5, October 2002, pp. 813-825.
- [5] W. Perruquetti, J.P. Richard, S.V. Drakunov, "Estimateurs de retards basés sur un observateur à mode glissant, CIFA'2004, Tunisie.
- [6] E. Fridman, F. Gouaisbaut, M. Dambrine and J.P. Richard, "Sliding mode control of systems with time-varying delays via descriptor approach", International Journal of Systems Science.
- [7] F. Michaud, F. Lepage, "A Tool to Monitor the Network Quality of Service", NET-CON'2002, IFIP Conference on Network Control and Engineering, Paris, France, Octobre 2002.
- [8] D. J. Stilwell, "Decentralized Control Synthesis for a Platoon of Autonomous Vehicles", Proceeding of the 2002 IEEE ICRA, pp. 744-747, May 2002, Washington, DC, USA.
- [9] R. Zapata, R. Caciti, P. Lepinay, "DVZ-Based Collision Avoidance Control of Non-holonomic Mobile Manipulator", JESA, Vol 38, N5, PP. 559-588.
- [10] M. Milan, "Real-Time Ooptimal Trajectory Generation for Constrained Dynamical Systems", PhD. Thesis. California Institute of Technology, 2003.
- [11] P. Martin, "Contribution à l'étude des systèmes différentiellement plats", thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1992.