

Suivi de trajectoire d'un robot mobile non holonome en présence de retards sur les mesures

El-Hadi GUECHI, Jimmy LAUBER, Michel DAMBRINE

(1) Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

(2) UVHC, LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

(3) CNRS, FRE 3304, F-59313 Valenciennes, France

{El-hadi.Guechi, Jimmy.Lauber, Michel.Dambrine}@univ-valenciennes.fr

Résumé— Cet article présente la commande d'un robot mobile non-holonome de type unicycle pour le suivi de trajectoire. Cette dernière est une courbe de Bézier C^5 déterminée de manière à prendre en compte les contraintes sur les vitesses de départ et d'arrivée. Dans ce papier, nous supposons que les mesures de la position et de l'orientation du robot par caméra et traitement d'image induisent un retard constant. La commande de systèmes non linéaires à retard est délicate, mais en utilisant la structure spéciale du modèle, nous développons un observateur prédictif non-linéaire. La commande est déterminée en utilisant la technique de platitude que l'on déterminerait s'il n'y avait pas de retard en remplaçant l'état par sa prédiction. La stabilité exponentielle asymptotique du système bouclé est prouvée. Finalement, des résultats de simulations pour le suivi de trajectoire sont présentés.

Mots-clés— Robot mobile, suivi de trajectoire, retour de sortie retardé, stabilité, Observateur prédictif.

I. INTRODUCTION

Il existe différentes approches pour la stabilisation ou le suivi de trajectoire d'un robot mobile non-holonome de type unicycle. Le problème de la stabilisation de ce type de système est délicat du fait que la condition de Brockett [1] n'étant pas vérifiée, il ne peut exister de retour d'état de type continu et stationnaire. De nombreux auteurs proposent une solution partielle en assurant un suivi de trajectoires à validité locale. Par exemple, dans [7], les auteurs présentent une approche basée sur l'utilisation de modèle sous forme dite de Takagi-Sugeno [20-21] et l'emploi de commande PDC (Parallel Distributed Compensation). Dans [17], la commande par un retour dynamique linéarisant d'un robot mobile est proposée. Dans [11-12], une commande non linéaire par la combinaison d'un précompensateur et d'un retour est proposée. La convergence vers zéro de l'erreur de suivi de trajectoire est prouvée par l'utilisation d'une fonction de Lyapunov spécifique et les gains de stabilisation sont calculés par l'utilisation du linéarisé tangent du modèle de l'erreur de suivi. Des commandes de type neuro-flou pour le suivi de trajectoire sont proposées dans [4] et semblent présenter de bonnes qualités de robustesse. Afin d'assurer une stabilisation globale du robot, il faut envisager des lois de commandes non stationnaires [18] ou discontinues. Par exemple, [3] présente une commande par modes glissants d'ordre supérieur pour le suivi de trajectoire possédant certaines propriétés de robustesse. La technique de la platitude est aussi exploitée pour le suivi de trajectoire d'un robot mobile non-holonome [13, 5], la singularité à l'équilibre est évitée par l'utilisation d'un changement d'échelle de temps, conduisant à une

convergence exponentielle non plus en temps, mais en fonction de la distance parcourue.

Dans les travaux cités ci-dessus, les auteurs ne prennent pas en compte le retard sur les mesures, phénomène inévitable dans le cas d'un retour visuel comme utilisé pour les robots footballeurs ou l'exploration spatiale. Ces retards ont cependant une influence non négligeable sur le comportement dynamique du robot lorsqu'on cherche à obtenir des dynamiques rapides. Il existe cependant à l'heure actuelle peu de résultats sur la commande de systèmes non linéaires à retards. Des conditions d'existence d'un retour de sortie stabilisant et permettant le rejet asymptotique de perturbations sont données dans [6] sous forme d'équations aux dérivées partielles dont la résolution analytique ou approchée reste un problème ouvert. Une approche algébrique est proposée dans [14] et les références incluses. La technique de la platitude a été développée pour certaines classes bien particulières de systèmes [15], de même que la technique de stabilisation par l'approche « backstepping » [16].

L'approche proposée dans cet article est la conception d'une loi de commande avec retour de sortie qui prend en compte le retard sur les mesures par l'utilisation d'un observateur non-linéaire prédictif.

Cet article est organisé de la manière suivante : dans la Section II, la description du robot mobile considéré et son modèle cinématique sont présentés. Dans la Section III, l'observateur non-linéaire prédictif est développé, ainsi que le calcul de la commande par l'utilisation du principe de la platitude. Dans la section suivante, nous démontrons la stabilité exponentielle asymptotique de l'ensemble. Enfin, les résultats de simulation sont présentés dans la dernière section.

II. MODELE DU ROBOT MOBILE ET GENERATION DE TRAJECTOIRE

Avant d'aborder le problème de suivi de trajectoire, la première étape consiste à générer la trajectoire à suivre. Celle-ci doit être conçue en prenant en compte le modèle cinématique du robot et des contraintes physiques comme les vitesses et accélérations maximales du robot, ou d'autres dues à l'environnement. Dans cette section, nous commençons par présenter le modèle cinématique du robot, puis comment nous générons la trajectoire de référence.

A. Modèle cinématique

En prenant en compte la condition de roulement sans glissement, le modèle cinématique du robot mobile non

holonome de type unicycle dans le plan X-Y (Fig. 1) est donné par la formule suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = w \end{cases} \quad (1)$$

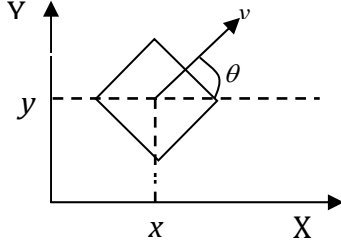


Figure.1. robot mobile

où $v(t)$ et $w(t)$ sont, respectivement, les vitesses linéaire et angulaire du robot mobile et représentent les entrées du robot. Les variables d'état (et de sortie) sont $x(t)$, $y(t)$, les coordonnées du centre de gravité du robot dans le plan, ainsi que $\theta(t)$, l'orientation du robot définie par l'angle entre le vecteur vitesse et l'axe X. La contrainte de non-holonomie associée au modèle cinématique (1) est donnée par la relation

$$\dot{x}(t)\sin(\theta(t)) - \dot{y}(t)\cos(\theta(t)) = 0 \quad (2)$$

B. Génération de la trajectoire de référence

La trajectoire de référence doit vérifier les conditions initiales et finales suivantes :

- la position du robot à l'instant initial t_0 est (x_i, y_i, θ_i) et sa vitesse initiale est v_i ;
- la position du robot à l'instant final t_f est (x_f, y_f, θ_f) et sa vitesse finale est v_f .

Pour la trajectoire de référence, on fait l'hypothèse que la vitesse linéaire est toujours strictement positive.

La trajectoire de référence est choisie sous la forme d'une courbe de Bézier C^5 donnée par les formules suivantes :

$$x_r(u) = \sum_{k=0}^5 C_n^k x_k u^k (1-u)^{5-k} \quad (3)$$

$$y_r(u) = \sum_{k=0}^5 C_n^k y_k u^k (1-u)^{5-k} \quad (4)$$

Le paramètre $u \in [0,1]$ représente le temps normalisé : $u = (t - t_0) / (t_f - t_0)$.

Le temps final t_f est calculé de telle sorte que la vitesse linéaire maximale du robot ne dépasse pas v_{max} [8].

Les coordonnées des points de contrôle de la courbe de Bézier sont données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} x_0 &= x_i & y_0 &= y_i \\ x_1 &= x_i + \frac{1}{5}(t_f - t_0)v_i \cos(\theta_i) & y_1 &= y_i + \frac{1}{5}(t_f - t_0)v_i \sin(\theta_i) \\ x_2 &= x_i + d_i \cos(\theta_i) & y_2 &= y_i + d_i \sin(\theta_i) \\ x_3 &= x_f - d_f \cos(\theta_f) & y_3 &= y_f - d_f \sin(\theta_f) \\ x_4 &= x_f - \frac{1}{5}(t_f - t_0)v_f \cos(\theta_f) & y_4 &= y_f - \frac{1}{5}(t_f - t_0)v_f \sin(\theta_f) \\ x_5 &= x_f & y_5 &= y_f \end{aligned}$$

Les points de contrôle (x_1, y_1) et (x_4, y_4) assurent que le robot démarre avec une orientation initiale θ_i et atteindra sa position finale avec une orientation θ_f . Les paramètres d_i et d_f apportent des degrés de liberté supplémentaires et peuvent être obtenus par minimisation d'un critère donné (courbe de longueur minimale, temps final le plus petit, ...) de manière semblable à [10]. Dans le mouvement avant du robot, les vitesses linéaire et angulaire v_r , w_r sont obtenues en utilisant le principe de platitude [5], comme suit :

$$\begin{aligned} v_r &= \sqrt{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \\ w_r &= \frac{\dot{x}_r \ddot{y}_r - \dot{y}_r \ddot{x}_r}{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \end{aligned} \quad (5)$$

III. SYNTHÈSE DE L'OBSERVATEUR-PREDICTEUR ET DU CONTROLEUR

Dans notre application, la position du robot est mesurée à l'aide d'une caméra. Le traitement d'image associé introduit un retard sur les sorties mesurées, que l'on supposera constant et de valeur connue. Dans cette section, la technique de bouclage dynamique linéarisant est modifiée en utilisant un observateur-prédicteur afin de compenser le retard.

A. Rappel : bouclage dynamique linéarisant

Après dérivation des deux premières équations du modèle (1), on obtient le système suivant

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & -\sin(\theta(t)) \\ \sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ v(t)w(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

A partir de (6), on choisit le régulateur dynamique suivant :

$$\begin{cases} \dot{v}(t) = u_1(t) \cos \theta(t) + u_2(t) \sin \theta(t) \\ w(t) = \begin{cases} (-u_1(t) \sin \theta(t) + u_2(t) \cos \theta(t)) / \varpi & \text{si } |v(t)| < \varpi \\ (-u_1(t) \sin \theta(t) + u_2(t) \cos \theta(t)) / v(t) & \text{si } |v(t)| \geq \varpi \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

où ϖ est une constante positive arbitrairement petite.

Remarque : La constante ϖ dans le régulateur dynamique est introduite afin d'éviter le problème de singularité qui est une conséquence directe des propriétés structurelles des robots mobiles non holonomes. Néanmoins, seule une stabilité pratique des erreurs de suivi peuvent être garanties en utilisant un tel retour. On supposera dans la suite que la trajectoire est telle que, à tout instant, $v(t) \geq \bar{\varpi}$.

En utilisant (7), le système s'écrit :

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = u_1(t) \\ \ddot{y}(t) = u_2(t) \end{cases} \quad (8) \quad \begin{cases} \dot{v}(t) = u_1(t) \cos \hat{\theta}(t) + u_2(t) \cdot \sin \hat{\theta}(t) \\ w(t) = (-u_1(t) \sin \hat{\theta}(t) + u_2(t) \cos \hat{\theta}(t)) / v(t) \end{cases} \quad (13)$$

Le suivi de trajectoire est alors assuré en choisissant

$$\begin{cases} u_1 = \ddot{x}_r + k_1(x_r - x) + k_2(\dot{x}_r - \dot{x}) \\ u_2 = \ddot{y}_r + k_1(y_r - y) + k_2(\dot{y}_r - \dot{y}) \end{cases} \quad (9) \quad \begin{cases} u_1 = \ddot{x}_r + k_1(x_r - \hat{x}) + k_2(\dot{x}_r - \dot{\hat{x}}) \\ u_2 = \ddot{y}_r + k_1(y_r - \hat{y}) + k_2(\dot{y}_r - \dot{\hat{y}}) \end{cases} \quad (14)$$

où $k_1, k_2 > 0$.

B. Synthèse de l'observateur-prédicteur

On étend ici au cas de la commande d'un robot mobile la technique de l'observateur-prédicteur utilisée précédemment pour compenser le retard dans le cadre des systèmes linéaires [2,19]. L'observateur choisi a pour expression :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = v(t) \cos \hat{\theta}(t) - L_1(x(t-\tau) - \hat{x}(t-\tau)) \\ \dot{\hat{y}}(t) = v(t) \sin \hat{\theta}(t) - L_2(y(t-\tau) - \hat{y}(t-\tau)) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) = w(t) - L_3(\theta(t-\tau) - \hat{\theta}(t-\tau)) \end{cases} \quad (10)$$

où $\hat{x}(t), \hat{y}(t)$ et $\hat{\theta}(t)$ sont les estimations des sorties $x(t), y(t)$ et $\theta(t)$; τ représente le retard sur les mesures des sorties.

Théorème : Si les gains $L_i \in]0, \pi / (2\tau)[$ pour $i \in \{1, 2, 3\}$ et la vitesse linéaire du robot est bornée ($|v(t)| \leq v_{\max}$), alors l'erreur d'observation converge exponentiellement vers 0.

Preuve : Les erreurs d'estimation $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, $\tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ et $\tilde{\theta}(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t)$ vérifient les équations

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = -L_1 \tilde{x}(t-\tau) + e_1(t) \\ \dot{\tilde{y}}(t) = -L_2 \tilde{y}(t-\tau) + e_2(t) \\ \dot{\tilde{\theta}}(t) = -L_3 \tilde{\theta}(t-\tau) \end{cases} \quad (11)$$

où :

$$\begin{cases} e_1(t) = v(t)(\cos \theta(t) - \cos \hat{\theta}(t)) \\ e_2(t) = v(t)(\sin \theta(t) - \sin \hat{\theta}(t)) \end{cases} \quad (12)$$

La troisième équation ne fait intervenir que la variable $\tilde{\theta}$ et est exponentiellement stable pour $0 < L_3 < \pi / (2\tau)$ (cf., par exemple, [9]). Comme $|e_i(t)| \leq |\tilde{\theta}(t)| v_{\max}$ ($i=1,2$), les deux premières équations sont des équations linéaires, asymptotiquement stable perturbées par un terme convergeant exponentiellement vers 0. $\tilde{x}(t)$ et $\tilde{y}(t)$ convergent donc exponentiellement vers 0.

C. Synthèse du contrôleur

La loi de commande est obtenue en remplaçant $\theta(t)$ par $\hat{\theta}(t)$ dans le régulateur dynamique :

avec, de même, $u_1(t)$ et $u_2(t)$ donnés par :

IV. STABILITE DE LA BOUCLE FERMEE

On montre dans cette section que, sous les hypothèses faites précédemment, la trajectoire du robot converge exponentiellement vers la trajectoire de référence.

En remplaçant (14) dans (6), on obtient les équations :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta}(t) & -\sin \tilde{\theta}(t) \\ \sin \tilde{\theta}(t) & \cos \tilde{\theta}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Notons $e_x(t) = x(t) - x_r(t)$ et $e_y(t) = y(t) - y_r(t)$ les erreurs de posture entre la trajectoire de référence et la trajectoire réelle du robot mobile. Par l'utilisation de ces notations et de l'équation (15), on déduit les équations différentielles

$$\begin{bmatrix} \ddot{e}_x \\ \ddot{e}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 e_x + k_2 \dot{e}_x \\ k_1 e_y + k_2 \dot{e}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta} & -\sin \tilde{\theta} \\ \sin \tilde{\theta} & \cos \tilde{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -k_1 \tilde{x} - k_2 \dot{\tilde{x}} \\ -k_1 \tilde{y} - k_2 \dot{\tilde{y}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 + \cos \tilde{\theta} & -\sin \tilde{\theta} \\ \sin \tilde{\theta} & -1 + \cos \tilde{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_r + k_1 e_x + k_2 \dot{e}_x \\ \ddot{y}_r + k_1 e_y + k_2 \dot{e}_y \end{bmatrix} \quad (16)$$

que l'on réécrit en introduisant l'état

$$X(t) = [e_x(t) \quad \dot{e}_x(t) \quad e_y(t) \quad \dot{e}_y(t)]^T$$

sous la forme

$$\dot{X}(t) = (A + \Delta A(t))X(t) + \beta(t) \quad (17)$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_1 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & k_1 & k_2 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 \alpha_1(t) & k_2 \alpha_1(t) & -k_1 \alpha_2(t) & -k_2 \alpha_2(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 \alpha_2(t) & k_2 \alpha_2(t) & k_1 \alpha_1(t) & k_2 \alpha_1(t) \end{bmatrix},$$

$$\beta(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_2(t) \\ 0 \\ \beta_4(t) \end{bmatrix}$$

et $\alpha_1(t) = -1 + \cos \tilde{\theta}(t)$,

$\alpha_2(t) = \sin \tilde{\theta}(t)$,

$\beta_2(t) = \alpha_1(t)\ddot{x}_r(t) - (1 + \alpha_1(t))(k_1\tilde{x}(t) + k_2\dot{\tilde{x}}(t))$
 $+ \alpha_2(t)(-\ddot{y}_r(t) + k_1\tilde{y}(t) + k_2\dot{\tilde{y}}(t))$,

$\beta_4(t) = \alpha_1(t)\ddot{y}_r(t) - (1 + \alpha_1(t))(k_1\tilde{y}(t) + k_2\dot{\tilde{y}}(t))$
 $- \alpha_2(t)(-\ddot{x}_r(t) + k_1\tilde{x}(t) + k_2\dot{\tilde{x}}(t))$

D'après la section précédente, les fonctions $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$, $\tilde{x}(t)$, $\dot{\tilde{x}}(t)$, $\tilde{y}(t)$, et $\dot{\tilde{y}}(t)$ convergent exponentiellement vers 0. En supposant que la trajectoire de référence est telle que les fonctions $\ddot{x}_r(t)$ et $\ddot{y}_r(t)$ soient bornées, alors il est clair que $\Delta A(t)$ et $\beta(t)$ convergent exponentiellement vers 0, et donc qu'il en va de même pour l'état $X(t)$.

RESULTATS DE SIMULATION

Quelques résultats de simulation sont présentés afin de montrer l'efficacité de l'approche proposée. La valeur du retard choisie pour cette simulation est $\tau = 0.1s$. À la figure 3, on observe que la trajectoire réelle du robot (ligne en pointillé) converge vers la trajectoire de référence (ligne pleine). Les vitesses linéaire et angulaire du robot sont données par les figures 4 et 5 respectivement. La position initiale du robot est $(x_i = 0.2m, y_i = 0.8m, \theta_i = 0^\circ)$. On peut observer sur la Fig. 4 que vers la fin de la trajectoire la commande en vitesse linéaire a été saturée à la vitesse maximale du robot (environ 0,3 m/s) sans que la trajectoire du robot ne s'écarte trop de celle de référence.

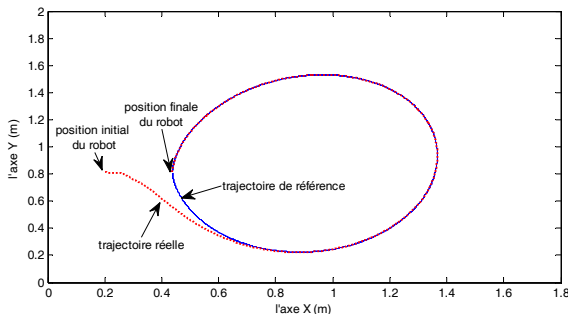


Fig. 3. Suivi de trajectoire avec un retour de sortie retardé : trajectoires de référence et réelle du robot.

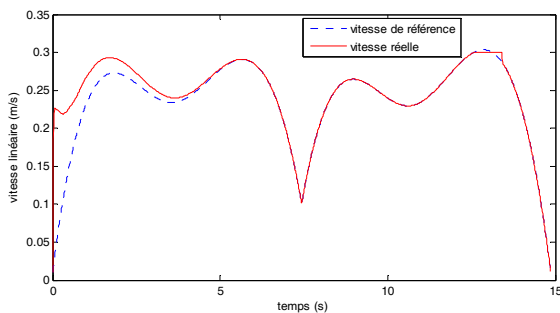


Fig. 4. Comparaison entre les vitesses linéaires réelle et de référence du robot.

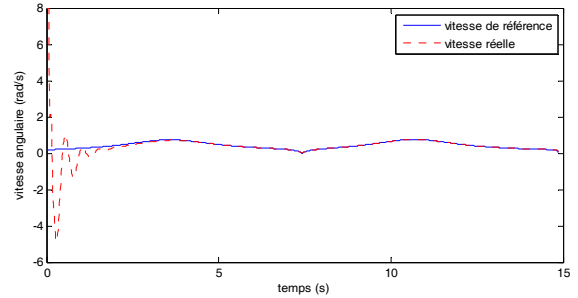


Fig. 5. Comparaison entre la vitesse angulaire réelle et de référence du robot.

V. CONCLUSION

Cet article propose une nouvelle technique pour le suivi de trajectoire d'un robot mobile non-holonyme de type unicycle dans le cas où les sorties du système sont retardées. Le retard est considéré comme constant et il est dû au capteur et au traitement d'image. Cette technique peut être également utilisée dans le cas de robots télé-opérés. Un observateur-prédicteur non linéaire est défini et utilisé pour compenser le retard à la manière d'un prédicteur de Smith généralisé, mais ici pour un système non linéaire. La stabilité exponentielle asymptotique de la boucle fermée est prouvée. Enfin, des résultats de simulation dans le cadre de suivi de trajectoire montrent l'efficacité de l'approche proposée.

REMERCIEMENTS

Le présent travail de recherche est financé par CISIT (Campus International pour la Sécurité et l'Intermodalité dans les Transports), la DRRT, le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, la Région Nord Pas de Calais et le CNRS : les auteurs remercient ces institutions pour leur soutien.

RÉFÉRENCES

- [1] Brockett, R.W. "Asymptotic stability and feedback stabilization". In: *Differential Geometric Control Theory* (R.S. Millman, R.W. Brockett and H.J. Sussmann, Eds), Birkhauser, 1983
- [2] Chamroo, A., Seuret, A., Vasseur, C., Richard, J-P., Wang, H.P. "Observing and controlling plants using their delayed and sampled outputs". *IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, pp 851-857, 2006
- [3] Defoort, M., Floquet, T., Kokosy, A., Perruquetti, W. "Sliding-Mode formation control for cooperative autonomous mobile robots" *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.55, N° 11, pp 3944-3953, 2008
- [4] Er, M.J., Tan, T-P., Loh, S-Y. "Control of a mobile robot using generalized dynamic fuzzy neural networks". *Microprocessors and Microsystems*, 491-498, 2004
- [5] Fliess, M., Levine J., Martin, Ph. and Rouchon, P. "Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples", *Int. J. Control*. Vol. 61, n°6, pp. 1327-1361, 1995
- [6] Fridman, E. "Output regulation of nonlinear systems with delay". *Systems & Control Letters*, 50(2), 81-93, 2003
- [7] Guechi, El-H., Lauber, J., Dambrine, M., Blažič, S., Klančar, G. "Tracking-error model-based PDC control for mobile robots with acceleration limits". *FUZZ-IEEE'09*, pp 197-202, 2009
- [8] Guechi El H., Lauber J. and Dambrine M. "On-line moving-obstacle avoidance using Bézier curves with unknown obstacle trajectory". *16th Mediterranean Conference. On Control and Automation, IEEE MED'08*, pp. 505-510, 2008
- [9] Hale, J.K. *Theory of functional differential equations*, Springer, New-York, 1977
- [10] Jolly, K. G., Sreerama Kumar, Vijayakumar R. "A Bezier curve based path planning in a multi-agent robot soccer system without violating the acceleration limits". *Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 57, n°1, pp.23-33, 2009

- [11] Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F. and Noguchi, T. "A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot". Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91. Vol. 3. Osaka, Japan, pp. 1236-1241, 1991
- [12] Klancar, G and Skrjanc, I. "Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time". *Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 55, n°3, pp. 460-469, 2007
- [13] Laumond, J-P. *Robot Motion Planning and Control*, LNICS. Vol. 229, Springer, 1998
- [14] Marquez-Martinez L., Moog C. "Input-output feedback linearization of time-delay systems", *IEEE Trans. on Automatic Control* 49(5), 781-786, 2004
- [15] Mounier H., Rudolph R. "Flatness-based control of nonlinear delay systems: a chemical reactor example". *Int. J. of Control*, vol. 71, 871-890, 1998
- [16] Nguang, S. K. "Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems". *IEEE Trans. on Automatic Control*, 45(4), 756-762, 2000
- [17] Oriol, G., De luca, A., Vendittelli, M. "WMR control dynamic feedback linearization: design, implementation, and experimental validation". *IEEE Trans. on Control Technology*, 10(6), 2002
- [18] Samson, C. "Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots". *Int. J. of Robotics Research*, 12(1), 55-64, 1993
- [19] Seuret, A., Michaut, F., Richard, J-P., Divoux, T. "Networked control using GPS synchronization". American Control Conference, 4195-4200, 2006
- [20] Takagi, T, Sugeno, M, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control". *IEEE Trans. on System Man and Cybernetics*, 15(1), 116-132, 1985
- [21] Tuan, H. D., Apkarian P., Narikiyo, T., and Yamamoto, Y. "Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design". *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol.9, 324-332, 2001