

Algoritmo para obtener la formación de un grupo de robots autónomos



A. Rojas Pacheco^{1,2}, J. J. Medel Juárez^{2,3}

¹*Departamento de Ingeniería, Unidad Profesional en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional. Av. IPN 2580. Col. Laguna-Ticomán, 07350, México, D. F.*

²*Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Legaria 694. Col. Irrigación, 11500, México, D.F.*

³*Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n esq. Miguel Othón de Mendizabal, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Colonia Industrial Vallejo, 07738, México, D. F.*

E-mail: arrojas75@hotmail.com

(Recibido el 1 de Noviembre de 2010; aceptado el 17 de Diciembre de 2010)

Resumen

En este artículo se propone un algoritmo para obtener la formación de un grupo de robots mientras que en conjunto siguen una trayectoria en el espacio 3D. El algoritmo requiere conocer la trayectoria mencionada y con base en ello y los vectores de ubicación de cada robot dentro de la formación, calcula las trayectorias que cada uno debe seguir para lograr la formación y mantenerse dentro de ella. El control del seguimiento de trayectorias que cada robot realiza se logra, en este artículo, por medio de una ley de control prealimentada, la cual funciona debido a que el modelo considerado para los robots es el de una masa puntual.

Palabras clave: Robots autónomos, Seguimiento de trayectorias, Control Convencional.

Abstract

A new algorithm for solving the problem of controlling the formation of groups of autonomous vehicles modeled as point masses with input forces aligned to the axes of the coordinate system of space, it is proposed in this paper. The algorithm is based on the idea that the group of vehicles following a virtual or real leader, which is located at the origin of the coordinate system associated with the path, while each of the members of group are located within the formation through an eigenvector of each vehicle and that defines its position within the formation. This vector, which is always the same with respect to the coordinate system associated with the professional career, is transformed into another vector that changes and updates the vehicle's position relative to the axis of space. This new vector is generated by the individual path that each vehicle must continue to remain within the formation. To this end, it uses a feedforward control law, but could be used any available control law for path following.

Keywords: Autonomous Vehicles, Path following, Conventional Control.

PACS: 07.07.Tw, 45.40.Ln, 45.30.+s

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El control de formaciones y el control de movimiento coordinado de sistemas mecánicos y vehículos autónomos han recibido considerable atención en años recientes [1]. Se ha encontrado que existen tareas que serían realizadas de manera más eficiente empleando un equipo de robots que por un robot único [2], tal es el caso del control de vehículos múltiples marinos, aéreos, terrestres [3], para realizar tareas de mapeo [4], vigilancia y operaciones coordinadas [5], por mencionar algunas.

En la literatura se han propuesto diversas estrategias y enfoques para resolver el problema del control de la formación de vehículos autónomos múltiples, siendo las principales estrategias las conocidas como: "método líder-

seguidor" [6, 7, 8], "método de estructura virtual" [4, 6, 9], "métodos basados en comportamiento" [10, 11, 12], "métodos basados en teoría de grafos" [2, 13] y métodos basados en el 'consensus problem' [5, 14]. Por otro lado, también han sido propuestos métodos que combinan diferentes estrategias [15].

En este artículo se propone un nuevo algoritmo para resolver el problema del control de la formación de grupos de vehículos autónomos modelados como masas puntuales con fuerzas de entrada alineadas a los ejes del sistema coordinado del espacio. Se tiene como base la idea de que el grupo de vehículos sigue a un líder virtual (puede ser real), el cual se encuentra ubicado en el origen del sistema coordinado asociado a la trayectoria de la formación, mientras cada uno de los integrantes del grupo se ubican

dentro de la formación por medio de un vector propio de cada vehículo y que define su posición dentro de la formación. Este vector, que siempre es el mismo respecto al sistema coordenado asociado a la trayectoria de formación, se transforma en otro vector que va cambiando y actualiza la posición del vehículo respecto al sistema de ejes del espacio. Este nuevo vector es el que genera la trayectoria individual que cada vehículo tiene que seguir para mantenerse dentro de la formación. Para este fin, se emplea una ley de control prealimentado [16], sin embargo podría emplearse cualquier ley de control para el seguimiento de trayectorias disponible, en la literatura [17].

En la sección II se describe el algoritmo aplicado a una formación en triángulo de tres robots y se diseña una ley de control para el seguimiento de trayectorias que realizan los robots, con base en el control prealimentado. En la sección III se muestran y discuten los resultados de simulación que se obtuvieron para el caso de la formación mencionada. Finalmente, en la sección IV, se describen las conclusiones referentes al presente trabajo y se comentan algunas direcciones que pudiera tomar el trabajo de investigación a futuro.

II. ALGORITMO PARA LA FORMACIÓN DE ROBOTS AUTÓNOMOS

En esta sección se explica el funcionamiento y detalles del algoritmo para obtener la formación de vehículos autónomos, suponiendo que estos se comportan como una masa puntual, sin embargo como se verá más adelante esto no afecta a la implementación del algoritmo si se cuenta con una ley de control adecuada para el seguimiento de trayectorias de los vehículos.

El planteamiento del problema que con este algoritmo se resuelve es de la siguiente manera: se requiere que un grupo de n vehículos, que se desplazan en el espacio tridimensional, viajan hasta ubicarse en la posición necesaria para obtener y sostener una formación mientras que siguen una trayectoria de movimiento. Se considera que la comunicación entre los vehículos es nula, parten de diferentes condiciones iniciales de posición y cada uno realiza mediciones únicamente de sus propios estados (velocidad, posición, etcétera).

A. Algoritmo

De acuerdo a la formulación, se supone que se tienen $n=3$ robots desplazándose en el espacio con coordenadas $\xi: XYZ$ (figura 1). La dinámica de cada robot se describe por las ecuaciones de movimiento para una partícula, dada por:

$$\begin{aligned} \ddot{X}_n &= \frac{1}{m} U_{xn} \\ \ddot{Y}_n &= \frac{1}{m} U_{yn} \\ \ddot{Z}_n &= \frac{1}{m} U_{zn} \end{aligned} \quad (1)$$

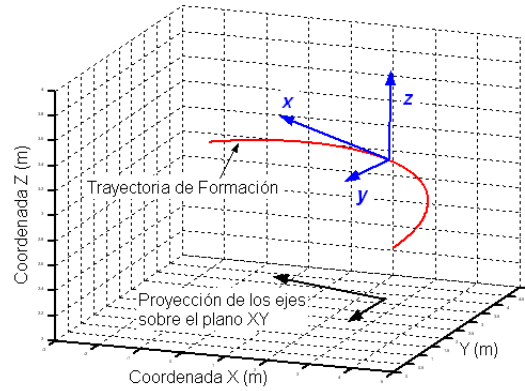


FIGURA 1. Ilustración de los sistemas de ejes coordenados, empleados en el algoritmo.

Donde (X_n, Y_n, Z_n) es la posición (en metros) del n -ésimo robot, m es la masa (en kilogramos), que por simplicidad se considera ser la misma para todos los vehículos y (U_{xn}, U_{yn}, U_{zn}) son las entradas (fuerzas) de control (en N o $Kg \cdot m/s^2$) al n -ésimo robot.

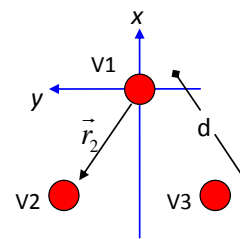


FIGURA 2. Formación en triángulo, d es la distancia entre los vehículos y r_2 es el vector de posición de V_2 .

Se desea que el grupo de robots se mueva en formación de acuerdo a la Fig. 2, siguiendo una trayectoria de formación dada por

$$\vec{\sigma}(t) = \sigma_X(t)\vec{i} + \sigma_Y(t)\vec{j} + \sigma_Z(t)\vec{k} \quad (2)$$

Esta trayectoria de formación tiene asociada un sistema de ejes coordenado $\gamma: xyz$, respecto al cual se establecen los vectores de posición para cada vehículo. Estos vectores y el número de ellos, cambiarán de acuerdo a la formación que en el momento se esté tratando, teniendo que ser calculados para tal propósito, en relación a (1). En este caso y con motivos de ilustración, de acuerdo a la figura 2, los vectores que corresponden en función de la distancia “ d ” son

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= 0\vec{i} + 0\vec{j} + 0\vec{k} \\ \vec{r}_2 &= -\frac{\sqrt{3}}{2}d\vec{i} + \frac{1}{2}d\vec{j} + 0\vec{k} \\ \vec{r}_3 &= -\frac{\sqrt{3}}{2}d\vec{i} - \frac{1}{2}d\vec{j} + 0\vec{k} \end{aligned} \quad (3)$$

Cada uno de estos vectores los tiene programados de antemano, cada vehículo. De esta forma, cada uno de ellos, conocerá su posición dentro de la formación. A continuación se calcula el ángulo φ de la dirección en que avanza la trayectoria de la formación, como se observa en la figura 3, para lo cual se obtiene la derivada de (2) con respecto al tiempo

$$\frac{d\vec{\sigma}(t)}{dt} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} \quad (4)$$

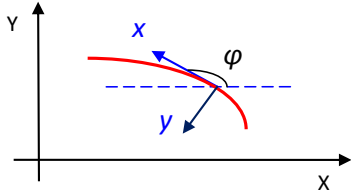


FIGURA 3. Dirección de avance de la formación sobre una trayectoria dada.

Y considerando únicamente la componente proyectada sobre el plano XY en el espacio de coordenadas $\xi: XYZ$ de (4), se tiene

$$\varphi(t) = \frac{b}{|b|} \arccos \left[\frac{\left(\frac{d\vec{\sigma}(t)}{dt} \right)_{xy} \cdot \vec{i}}{\left| \left(\frac{d\vec{\sigma}(t)}{dt} \right)_{xy} \right|} \right] \quad (5)$$

Con base en (2), (3) y (5) se generan las trayectorias de referencia individuales que cada vehículo debe seguir, al obtener:

$$\vec{R}_n(t) = \vec{\sigma}(t) + D(t)\vec{r}_n \quad (6)$$

Donde $\vec{R}_n(t)$ es el vector de posición del n -ésimo robot o trayectoria individual respecto al espacio de coordenadas $\xi: XYZ$, \vec{r}_n son los vectores de posición del n -ésimo robot respecto al sistema de ejes coordenados $\gamma: xyz$, dados por (3) y $D(t)$ es la matriz de transformación dada por:

$$D(t) = \begin{pmatrix} \cos \varphi(t) & -\sin \varphi(t) & 0 \\ \sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

El ángulo φ esta dado por (5). El cálculo de las expresiones (2) a (6) es realizado de manera interna por cada vehículo para generar sus propias trayectorias individuales, las cuales deben seguir para mantenerse dentro de la formación y en la posición deseada. Para lograr este último punto, es decir, el

Algoritmo para obtener la formación de un grupo de robots autónomos seguimiento de las trayectorias de referencia individuales por cada robot, se emplea una ley de control derivada de la técnica de control prealimentado. Dada la dinámica considerada para los vehículos, es posible emplear diferentes técnicas de control [17].

B. Control prealimentado para el seguimiento de trayectorias

En esta sección se obtiene la ley de control para el seguimiento de las trayectorias de cada robot en el espacio. Para el diseño, se considera únicamente una de las componentes de la dinámica dada por (1), pues el resultado que se obtiene es igual para el resto de las componentes. El modelo a considerar es dado por

$$\ddot{X} = \frac{1}{m}U_x \quad (8)$$

Se define el error de control de seguimiento como

$$e(t) = R_x(t) - X(t) \quad (9)$$

Donde $R_x(t)$ es la componente en X de la trayectoria a seguir por el vehículo dada por (6) y $X(t)$ es la posición del vehículo, la cual en la simulación se obtiene de (8). Se propone que (9) decaiga con una dinámica dada por

$$\ddot{e}(t) + 2\zeta\omega\dot{e}(t) + \omega^2e(t) = 0 \quad (10)$$

Por lo tanto, el objetivo es obtener una ley de control U_x , que al emplear información de retroalimentación y de prealimentación, logre que $X(t)$ responda suficientemente rápido a una referencia arbitraria $R_x(t)$ y posteriormente la siga con un error de estado estacionario nulo ($e_{ss} = 0$). La expresión “suficientemente rápido” debe ser interpretada en términos de los valores de ζ y ω requeridos para lograr la respuesta transitoria deseada y calculados, a su vez, de las especificaciones en términos del tiempo de establecimiento (t_s) y el máximo sobreimpulso (M_p).

Respecto a (8), (9), (10) y siguiendo el procedimiento de [16] se deduce que una expresión para la ley de control que cumple con lo anterior es

$$U_x = m \left[\ddot{R}_x + 2\zeta\omega(\dot{R}_x - \dot{X}) + \omega^2(R_x - X) \right] \quad (11)$$

En las simulaciones mostradas se considera una masa $m = 1 \text{ Kg}$, y se propuso que el sistema en lazo cerrado responda con un $M_p < 5\%$ y un $t_s < 0.5 \text{ seg}$ ante un escalón de referencia, buscando con esto lograr una respuesta adecuada ante referencias arbitrarias. Los parámetros resultantes fueron $\zeta = 0.7071$ y $\omega = 16 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$ por lo tanto la ley de control empleada en las simulaciones se redujo a

$$U_x = \ddot{R}_x + 22(\dot{R}_x - \dot{X}) + 25(R_x - X) \quad (12)$$

Por cuestiones de simplicidad, dado que se consideran vehículos con las mismas características, en las simulaciones se emplearon tres expresiones idénticas a (12) para cada vehículo del grupo, una por cada grado de libertad.

III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se tienen tres robots desplazándose en el espacio moviéndose de acuerdo a (1). Se pretende que viajen en formación de acuerdo a la figura 2, haciendo $d = 0.5 \text{ m}$, mientras que el conjunto sigue una referencia dada por:

$$\vec{\sigma}(t) = 10\vec{i} + t\vec{j} + (2 - 2te^{-t} + \frac{4}{5}e^{-t})\vec{k} \quad (13)$$

La cual se ha buscado que sea una trayectoria suave como se puede ver en la figura 5. De acuerdo a la figura 2, los vectores de posición para cada vehículo dentro de la formación son

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= 0\vec{i} + 0\vec{j} + 0\vec{k} \\ \vec{r}_2 &= -\frac{\sqrt{3}}{4}\vec{i} + \frac{1}{4}\vec{j} + 0\vec{k} \\ \vec{r}_3 &= -\frac{\sqrt{3}}{4}\vec{i} - \frac{1}{4}\vec{j} + 0\vec{k} \end{aligned} \quad (14)$$

Cada robot sigue su trayectoria de referencia individual empleando un conjunto de tres leyes de control como la dada en (12), una por cada una de sus componentes. En las Figs. 4 y 5, se muestra el resultado de la simulación del algoritmo con los datos indicados. Las condiciones iniciales para cada vehículo fueron:

$$\begin{aligned} V_1 &:(10.5, -2, 0) \text{ metros} \\ V_2 &:(9, 0, 2) \text{ metros} \\ V_3 &:(11, 0, 1) \text{ metros} \end{aligned} \quad (15)$$

En la Fig. 4, se muestra la proyección de las respuestas del sistema sobre el plano XY, con el fin de hacer notar la correcta realización de la formación. Esto se puede observar más claramente con los valores de posición finales de la simulación, los cuales resultaron ser

$$\begin{aligned} V_1 &:(10.0009, 15.0011, 2.0004) \text{ metros} \\ V_2 &:(9.7508, 14.5681, 2.0002) \text{ metros} \\ V_3 &:(10.2509, 14.5681, 2.0002) \text{ metros} \end{aligned} \quad (16)$$

Con estos datos y haciendo los cálculos necesarios se puede comprobar la distancia de 0.5 m entre los robots.

En la Fig. 5 se observa la trayectoria de referencia, la evolución completa del grupo de robots desde sus condiciones iniciales y la forma en que el vehículo V_1 sigue su trayectoria individual. No se muestran las trayectorias individuales de V_2 y V_3 para lograr una mayor claridad en la

ilustración. La formación en triángulo se puede observar mejor al final de las trayectorias, ya que ahí se detiene el robot 1 y ocupando sus correspondientes lugares dentro de la formación se detienen los robots 2 y 3, tal y como se comentó en un párrafo anterior. Un resultado similar puede ser obtenido para cualquier referencia (siempre que sea una trayectoria suave), formación y cantidad de vehículos. Incluso el algoritmo presentado, puede ser fácilmente adaptado para vehículos que se desplacen en el plano (robots con ruedas) y para obtener formaciones diferentes durante el experimento.

La única restricción observada hasta el momento es que se debe contar con una ley de control adecuada para que el robot sea capaz de seguir fielmente su trayectoria de referencia individual y así ubicarse con la mayor precisión posible en la posición deseada dentro de la formación.

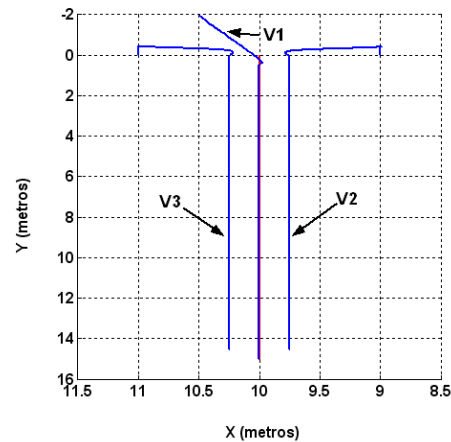


FIGURA 4. Proyección de las trayectorias de los vehículos sobre el plano XY.

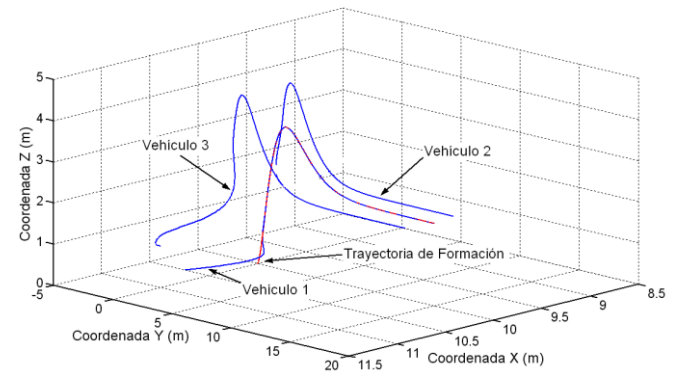


FIGURA 5. Resultado de la simulación del algoritmo para lograr la formación en triángulo.

En las Figs. 6 y 7, se observan las respuestas del sistema de robots para diferentes condiciones iniciales y con la misma referencia de formación. En el primer caso (Fig. 6) se tienen las condiciones iniciales

$$\begin{aligned} V_1 &: (10.5, -2, 0.5) \text{ metros} \\ V_2 &: (9, 0, 2) \text{ metros} \\ V_3 &: (11, 0, 1) \text{ metros} \end{aligned} \quad (17)$$

En el segundo caso (ver Fig. 7) se tienen

$$\begin{aligned} V_1 &: (10.5, -2, 0) \text{ metros} \\ V_2 &: (9, -5, 0) \text{ metros} \\ V_3 &: (11, -5, 1) \text{ metros} \end{aligned} \quad (18)$$

Las condiciones iniciales se modificaron muy ligeramente entre ellas, para evitar la gran cantidad de líneas que se forman en las gráficas, hacia sus respectivos estados estacionarios, con el objeto de que resultaran más claras. Sin embargo con estas ligeras variaciones se puede notar, en las Figs. 4 a 7, la forma en que las leyes de control dadas en (12) realizan su función. Nótese que sólo se ha incluido la trayectoria de formación y no las trayectorias individuales. En todos los casos, la formación se logra desde que cada vehículo alcanza su trayectoria individual.

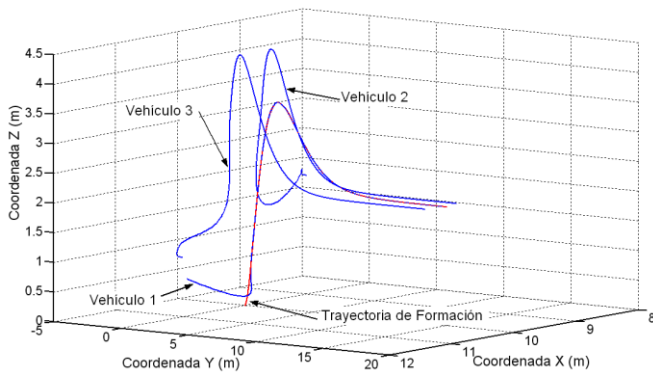


FIGURA 6. Resultado de la simulación del algoritmo para lograr la formación en triángulo. Condiciones iniciales dadas por (17).

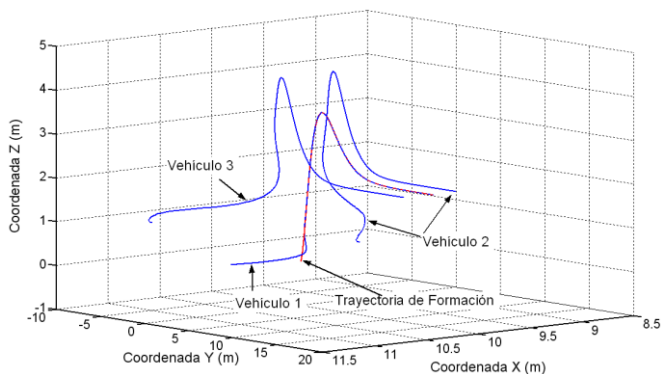


FIGURA 7. Resultado de la simulación del algoritmo para lograr la formación en triángulo. Condiciones iniciales dadas por (18).

IV. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un algoritmo para hacer que un grupo de robots autónomos logren y mantengan una formación arbitraria mientras todo el conjunto se mueve siguiendo una

Algoritmo para obtener la formación de un grupo de robots autónomos trayectoria en el espacio 3D. Por medio de este algoritmo cada vehículo emplea la trayectoria de formación y su propio vector de posición, respecto al origen del sistema de coordenadas, para calcular su trayectoria individual, la cual toma como trayectoria de referencia para su desplazamiento. El seguimiento de esta trayectoria individual se realiza gracias a una ley de control prealmentada diseñada e implementada para este fin, en cada uno de ellos. Se mostró la eficacia del algoritmo con el resultado obtenido de su simulación, aplicado a una formación en triángulo de tres vehículos siguiendo una trayectoria en particular, desde diferentes condiciones iniciales. Se comentó que una de las bondades del algoritmo es que puede ser modificado sin una gran dificultad, para resolver el problema de la formación de robots que se mueve en un plano (por ejemplo robots con ruedas), así como, el cambiar la formación durante la evolución del experimento. El siguiente paso en la presente investigación, sería la implementación y prueba del algoritmo en un sistema de robots autónomos reales para verificar su funcionamiento y mejorar posibles deficiencias, considerando por ejemplo, sus deslizamientos y cambios de masa. En el mismo sentido es interesante añadir un algoritmo para evitar choques entre los vehículos al momento de moverse para lograr la formación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Instituto Politécnico Nacional (IPN), a través de los respectivos centros de adscripción (CICATA, UPIITA, CIC), del permiso con número de oficio: SeAca/COTEPABE/PL-201/09, así como del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

REFERENCIAS

- [1] Chen, Y. and Wang, Z., *Formation control: A review and a new consideration*, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3664-3669 (2005).
- [2] Dong, W. J., Guo, Y. and Farrel, J. A., *Formation control of nonholonomic mobile robots*, Proc. of the American Control Conference, 5602-5607. Minneapolis, Minnesota, USA (2006).
- [3] Fahimi, F., *Sliding-Mode formation control for underactuated surface vessels*, IEEE Transactions on Robotics **23**, 617-622 (2007).
- [4] Ihle, I. F., Jouffroy, J. and Fossen, T. I., *Formation control of marine surface craft: A Lagrangian approach*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **31**, 922-934 (2006).
- [5] Cao Y., Ren, W., Sorensen, N., Ballard, L., Reiter, A. and Kennedy, J., *Experiments in consensus-based distributed cooperative control of multiple mobile robots*, Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2819-2823. Harbin, China (2007).

- [6] Egerstedt, M. and Hong, X. M., *Formation constrained multi-agent control*, IEEE Transactions of Robotics and Automation **17**, 947-951 (2001).
- [7] Leonard, N. E. and Fiorelli, E., *Virtual Leaders, artificial potential and coordinated control of groups*, Proc. of the 40th IEEE Conference Decision and Control, pp. 2968-2976, Orlando, FL. (2001).
- [8] Sun, Z., Li, B., Cai, W.C., Liao, X. H. and Song, Y. D., *Virtual leader based robust adaptive formation control of multi-unmanned ground vehicles (UGVs)*. Proc. of the American Control Conference, pp. 1876-1881. New York City, USA. (2007).
- [9] Ren, W. and Beard, R.W., *Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures*, IEE Proc. Control Theory Appl. **151**, 357-368 (2004).
- [10] Balch, T. and Arkin, R. C., *Behavior-based formation control for multirobot teams*, IEEE Transactions on Robotics and Automation **14**, 926-939 (1998).
- [11] Lawton, J. R., Beard, R. W. and Young. B., *A decentralized approach to formation maneuvers*, IEEE J. Robot Automation **19**, 933-941 (2003).
- [12] Antonelli, G., Arrichiello, Chakraborti, F. and Chiaverini, S., *Experiences of formation control of multi-robots systems with the null-space-based behavioral control*. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1068-073. Roma, Italia. (2007).
- [13] Desai, J. P., *A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations*, Journal of Robotics Systems **19**, 511-525 (2002).
- [14] Ren, W., *Consensus based formation control strategies for multi-vehicle systems*, Proc. of the American Control Conference, 4237-4242. Minneapolis, Minnesota, USA. (2006).
- [15] Sonrensen, N. and Ren, W., *A unified formation control scheme with a single or multiple leaders*. Proc. of the American Control Conference, 5412-5418. (2007)
- [16] Lewis, P. H. and Yang, C., *Sistemas de Control en Ingeniería*, Prentice Hall, Madrid, España. (1999)
- [17] Kahlil, H. K., *Nonlinear Systems*, 3rd Edition, (Prentice Hall, USA, 2002).