

## FORMACIÓN LÍDER-SEGUIDOR CONTROLADA POR COMPORTAMIENTOS BASADOS EN ESPACIO NULO

Gustavo Quintana Carapia<sup>1</sup>, Jorge S. Benítez Read<sup>2</sup>, J. Armando Segovia De los Ríos<sup>3</sup>

Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Ex-Rancho la Virgen, Metepec, México, C.P. 52140  
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac,  
México. C.P. 52750

Universidad Autónoma del Estado de México, Fac. de Ing., Cd. Universitaria, Toluca, México, C.P. 50100

<sup>1</sup>quintanacarapiag@gmail.com, <sup>2</sup>jorge.benitez@inin.gob.mx, <sup>3</sup>armando.segovia@inin.gob.mx

### RESUMEN

Se presenta una ampliación del control por comportamientos basado en espacio nulo para incluir la configuración completa, posición y orientación, en la definición de las funciones de tareas. Se proponen nuevas funciones de tareas elementales, considerando el control de tipo descentralizado en el planteamiento de las funciones. La combinación de las funciones se aplica para permitir el movimiento de una formación líder seguidor en presencia de obstáculos. Los resultados de los experimentos muestran la efectividad de la propuesta.

### 1. INTRODUCCIÓN

Se denomina formación a un grupo de robots móviles, cuyos integrantes son capaces de mantener una serie de posiciones predefinidas entre ellos. En una formación, el grupo es capaz de moverse como si se tratara de un solo individuo [1]. Generalmente cada miembro del grupo sigue reglas sencillas, por ejemplo: evitar colisiones con otros miembros, igualar la velocidad de los vecinos, tratar de mantenerse cerca de los miembros cercanos, entre otras. Las aplicaciones de las formaciones de robots incluyen la localización, la exploración, la manipulación de objetos y la conducción de vehículos no tripulados.

Existen varias formas de controlar las acciones de un robot, entre las que destaca, por su robustez y versatilidad, el control por comportamientos [2]. En el control por comportamientos, el problema general se descompone en sub-problemas, los cuales se resuelven en paralelo. Posteriormente, se combinan los resultados obtenidos de la ejecución en paralelo para originar la orden que mejor resuelve el problema general. Esta orden es dada al robot para ejecutar la acción deseada. Algunos

sinónimos del término “sub-problema” son “comportamiento” y “tarea”. La división del problema general en diferentes comportamientos permite realizar acciones complejas, como la navegación en entornos desconocidos. Se debe mencionar que el control por comportamientos tiene una dificultad principal en la terminación asíncrona de la ejecución de los comportamientos individuales. La falta de sincronía puede provocar órdenes de control equivocadas.

Para contrarrestar los efectos negativos de la falta de sincronía se proponen diferentes alternativas. Las soluciones al problema de la combinación de comportamientos se obtienen principalmente por dos métodos: competitivo o cooperativo. El método competitivo se caracteriza por considerar un solo comportamiento para crear la orden de control. De esta manera, los diferentes comportamientos activos compiten por llegar a ser el único elegido. El ejemplo clásico del método competitivo es el control distribuido por capas [2]. Por otra parte, el método cooperativo considera la aportación de todos los comportamientos activos mediante una suma ponderada de sus resultados. De esta manera todos los comportamientos participan en la generación de la orden de control. El esquema de control de movimientos [3] es un ejemplo de la aplicación del método cooperativo.

Existe un método híbrido que realiza la combinación de comportamientos. En su parte competitiva asigna una prioridad relativa a cada comportamiento y en su parte cooperativa realiza la proyección, de cada comportamiento, sobre el espacio nulo de los comportamientos de mayor prioridad. El control por comportamientos basado en espacio nulo se ha empleado en manipuladores redundantes [4] y en robots móviles [5].

En este trabajo, la principal aportación es la ampliación del control por comportamientos basado en espacio nulo, al incluir la orientación de los robots en el argumento de cada función de comportamientos. En la literatura aparecen resultados de este método aplicado a funciones que sólo dependen de la posición de los robots. Cuando se trabaja con robots móviles, el control basado en posiciones, no se asegura la orientación deseada de cada robot. En este artículo, las funciones de tareas dependen de la configuración completa de los robots: posición y orientación. Con este planteamiento, se diseñan nuevas funciones de tareas para realizar una formación líder seguidor. El movimiento de la formación líder seguidor se realiza manteniendo las distancias relativas entre los miembros del grupo y esquivando obstáculos, desde la perspectiva del control descentralizado.

En la sección 2 se presentan el modelo matemático del control por comportamientos basado en espacio nulo y las funciones diseñadas para el control de formación líder seguidor. En la sección 3 se describen los resultados obtenidos mediante simulación. En la sección 4 se presentan conclusiones sobre el desempeño de la técnica propuesta.

## 2. DESARROLLO

En este apartado se describen los modelos matemáticos de la formación líder seguidor y del método de espacio nulo para la combinación de comportamientos. Además, se describe la propuesta de funciones de tareas.

### 2.1. Formación líder-seguidor ( $d, \phi$ )

El modelo de un robot controlado por velocidad establece que un robot  $\mathbf{R}$  está definido por la posición y la orientación instantáneas,  $\mathbf{R}=(x,y,\theta)^T$ , el cual tiene la condición inicial  $\mathbf{R}(0)$  y tiene control  $(v, \omega)^T$ , cuando se verifica el siguiente sistema de ecuaciones (1):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \\ \mathbf{R}(0) = (x(0), y(0), \theta(0))^T \end{cases} \quad (1)$$

El sistema de ecuaciones (1) representa la cinemática diferencial del robot. Se denota la posición de  $\mathbf{R}$  en el instante  $t$  por  $\mathbf{p}(t)=(x(t), y(t))^T$ ,

y la orientación por  $\theta(t)$ . Considerando el modelo de un robot controlado por velocidad, se dice que los robots  $\mathbf{R}_L$  y  $\mathbf{R}_S$  están en formación líder seguidor ( $d, \phi$ ), con  $\mathbf{R}_L$  como líder, si se cumple, para  $t \geq 0$ , la relación mostrada en la ecuación (2):

$$\mathbf{p}_L(t) = \mathbf{p}_S(t) + d\tau(\theta_S(t) + \phi) \quad (2)$$

donde  $d > 0$  es la distancia de separación entre ambos robots y  $|\phi| < \pi/2$  es el ángulo del robot  $\mathbf{R}_L$  medido con respecto al marco de referencia  $\tau$  del robot  $\mathbf{R}_S$ . La relación geométrica de la formación líder seguidor ( $d, \phi$ ) se muestra en la figura 1.

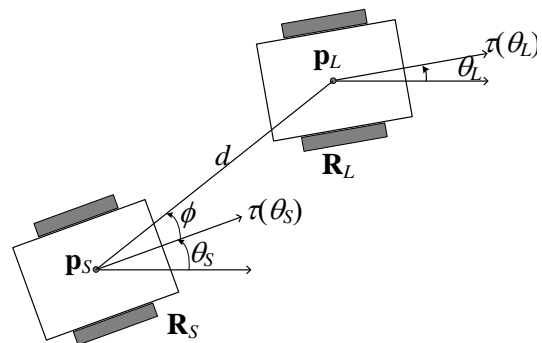


Figura 1. Formación líder seguidor ( $d, \phi$ ).

### 2.2. El control por comportamientos basado en espacio nulo

En el control por comportamientos basado en espacio nulo, los comportamientos se expresan por medio de funciones de tareas. Cada función de tareas,  $\sigma = \mathbf{f}(\mathbf{p}, \theta)$ , tiene como argumentos a la posición  $\mathbf{p}$  y a la orientación  $\theta$  instantáneas del robot y se plantean de acuerdo a los comportamientos básicos necesarios.

Al derivar la función de tareas, se observa que las velocidades del robot son directamente proporcionales a la variación de la función de tareas, a través de la matriz Jacobiana  $\mathbf{J}$ .

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{p}, \theta)}{\partial \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \theta \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\mathbf{p}, \theta) \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las velocidades deseadas se logran al invertir la relación presentada en la ecuación (3). Se requiere calcular la inversa de la matriz Jacobiana. Cuando la matriz Jacobiana no es cuadrada, se obtiene la pseudo inversa. En este último caso, el problema admite soluciones infinitas. Esta redundancia es

aprovechada para satisfacer restricciones adicionales del problema de control cinemático. Una de tales restricciones es la velocidad máxima que pueden desarrollar los motores de los robots. Considerando el acotamiento de la velocidad, una solución única de mínimos cuadrados se expresa en la ecuación (4).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \omega_d \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\boldsymbol{\sigma}}_d = \mathbf{J}^\dagger \dot{\boldsymbol{\sigma}}_d \quad (4)$$

Las posiciones y orientaciones deseadas,  $\mathbf{p}_d$  y  $\theta_d$ , se calculan a partir de las velocidades conocidas  $\mathbf{v}_d$  y  $\omega_d$  mediante la integración en tiempo discreto mostrada en la ecuación (5).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_d(t_k) \\ \theta_d(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_d(t_{k-1}) \\ \theta_d(t_{k-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_d(t_k) \\ \omega_d(t_k) \end{bmatrix} \Delta t \quad (5)$$

donde  $t_k$  es el  $k$ -ésimo instante de muestreo y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre muestras sucesivas.

La integración de las velocidades en tiempo discreto incrementa acumulativamente el error. Por este motivo se modifica (2) incorporando la diferencia entre los valores deseados y actuales de la función de tareas:  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}_d - \boldsymbol{\sigma}$ . Con la medición del error de la función de tareas se puede disminuir el efecto acumulativo del error de integración. La velocidad deseada, que satisface a una función de tareas, se calcula entonces con la ecuación (6).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i,d}(t_k) \\ \omega_{i,d}(t_k) \end{bmatrix} = \mathbf{J}_i^\dagger (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{i,d} + \boldsymbol{\Lambda}_i \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_i) \quad (6)$$

donde la matriz  $\boldsymbol{\Lambda}_i$  es una matriz diagonal, cuyos elementos son valores constantes y positivos.

En el método basado en espacio nulo, se descompone un problema en varias funciones de tareas, las cuales se ordenan jerárquicamente asignando una diferente prioridad a cada función. Las velocidades de la  $i$ -ésima función se calculan con la ecuación (6). El subíndice  $i$  indica la prioridad de la función, donde un valor de  $i=1$  establece la prioridad más alta posible, un valor de  $i=2$  asigna una prioridad menor a la anterior, y así sucesivamente.

El objetivo del control por comportamientos basado en espacio nulo es combinar las velocidades, que son los resultados de la evaluación de las funciones de tareas en la configuración actual. La combinación se realiza proyectando cada conjunto de velocidades sobre el espacio nulo de las velocidades de prioridad superior consecutiva. La combinación de las velocidades se expresa en la ecuación (7).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \omega_1 \end{bmatrix} + \mathbf{N}_1 \left( \begin{bmatrix} \mathbf{v}_2 \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \mathbf{N}_2 \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{v}_3 \\ \omega_3 \end{bmatrix} + \dots \right\} \right) \quad (7)$$

donde  $\mathbf{N}_i = \mathbf{I} - \mathbf{J}_i^\dagger \mathbf{J}_i$  es el espacio nulo de la función de prioridad  $i$ .

Esta proyección sobre el espacio nulo contrarresta los componentes de velocidad de la función de prioridad menor que tendrían conflicto con los componentes de velocidad de la función de prioridad mayor. En caso de que exista algún conflicto, se evita la ejecución de la tarea de menor prioridad. Esta robustez permite diseñar misiones complejas.

### 2.3. Funciones de tareas propuestas

La segunda aportación del presente artículo, son las funciones de tareas que se combinan para controlar, de manera descentralizada, los movimientos de cada robot para mantener una formación líder seguidor ( $d, \phi$ ). Las funciones propuestas permiten el movimiento de la formación líder seguidor manteniendo las distancias relativas entre los miembros del grupo y esquivando obstáculos.

#### 2.3.1 Definición de funciones

##### A. Función "Avanzar"

Esta función de tareas otorga al robot seguidor la capacidad de moverse, hacia adelante o hacia atrás, modificando su orientación. La función de tareas  $\boldsymbol{\sigma}_a$  está expresada en la ecuación (8).

$$\boldsymbol{\sigma}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_s \\ \theta_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

donde  $\mathbf{p}_s$  es el vector de posición y  $\theta_s$  la orientación del robot seguidor. El valor deseado de la función,  $\boldsymbol{\sigma}_{a,d}$ , implica un movimiento en el que avanza  $c_1$  unidades lineales y  $c_2$  unidades rotacionales, como se observa en la ecuación (9).

$$\sigma_{a,d} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_S + c_1 \tau(\theta_S) \\ \theta_S + c_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

La matriz Jacobiana  $\mathbf{J}_a$ , que resulta de la primera derivada de la función  $\sigma_a$ , y su inversa  $\mathbf{J}_a^\dagger$ , ambas de dimensiones  $2 \times 2$ , son la matriz identidad. Las velocidades  $\mathbf{v}_a$  y  $\omega_a$ , para este comportamiento se muestran en la ecuación (10).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_a \\ \omega_a \end{bmatrix} = \dot{\sigma}_a + \Lambda_a \tilde{\sigma}_a \quad (10)$$

### B. Función “Colocarse en formación ( $d, \phi$ )”

Esta función de tareas representa el comportamiento encargado tanto de colocar al robot seguidor en formación ( $d, \phi$ ). Para esto se deben cumplir dos requisitos. Primero, que el robot seguidor esté a una distancia  $d$  del robot líder. Segundo, que el robot seguidor se oriente de manera que desde su marco de referencia local, el robot líder se ubique en un ángulo  $\phi$ . La función de tareas  $\sigma_{L,S}$  y su valor deseado  $\sigma_{L,S,d}$ , están expresadas en las ecuaciones (11) y (12).

$$\sigma_{L,S} = \begin{bmatrix} \|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\| \\ \text{atan } 2(\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S) - \theta_S \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sigma_{L,S,d} = \begin{bmatrix} d \\ \phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

La matriz Jacobiana  $\mathbf{J}_{L,S}$ , de dimensiones  $2 \times 3$ , que resulta de la primera derivada de la función  $\sigma_{L,S}$ , está expresada en la ecuación (13).

$$\mathbf{J}_{L,S} = \begin{pmatrix} -\frac{p_{L_x} - p_{S_x}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|} & -\frac{p_{L_y} - p_{S_y}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|} & 0 \\ \frac{p_{L_y} - p_{S_y}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2} & -\frac{p_{L_x} - p_{S_x}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2} & -1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_{L,S}^\dagger = \begin{pmatrix} -\frac{p_{L_x} - p_{S_x}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|} & \frac{p_{L_y} - p_{S_y}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2 + 1} \\ -\frac{p_{L_y} - p_{S_y}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|} & -\frac{p_{L_x} - p_{S_x}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2 + 1} \\ 0 & -\frac{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\|^2 + 1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

La matriz pseudo inversa  $\mathbf{J}_{L,S}^\dagger$ , de dimensiones  $3 \times 2$ , que se obtiene por el método Moore-Penrose [6], se muestra en la ecuación (14). Las velocidades  $\mathbf{v}_{L,S}$  y  $\omega_{L,S}$ , se obtienen a partir de la ecuación (15).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{L,S} \\ \omega_{L,S} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{L,S}^\dagger (\dot{\sigma}_{L,S} + \Lambda_{L,S} \tilde{\sigma}_{L,S}) \quad (15)$$

### C. Función “Esquivar obstáculos”

Esta función de tareas  $\sigma_o$  supervisa la distancia a la que se encuentran los obstáculos presentes en la cercanía de cada robot seguidor, como se puede observar en la figura 2. Mide la distancia entre la posición del robot seguidor  $\mathbf{p}_S$  y el punto más cercano del obstáculo  $\mathbf{p}_o$ . Evita los obstáculos manteniendo dicha distancia mayor que un valor de seguridad determinado por  $d_o$ . También la orientación se modifica, estableciendo un valor predeterminado  $\phi_o$ , de manera que se permita el avance del robot por los costados del obstáculo.

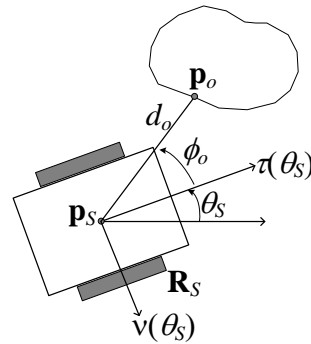


Figura 2. Robot en la cercanía de un obstáculo.

La función de tareas  $\sigma_{o,S}$  y su valor deseado  $\sigma_{o,S,d}$ , están expresadas en las ecuaciones (16) y (17).

$$\sigma_{o,S} = \begin{bmatrix} \|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S\| \\ \text{atan } 2(\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S) - \theta_S \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma_{o,S,d} = \begin{bmatrix} d_o \\ \phi_o - \text{sign}(\phi_o) \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{J}_{o,S} = \begin{pmatrix} -\frac{(p_{o_x} - p_{S_x})}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S\|} & -\frac{(p_{o_y} - p_{S_y})}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S\|} & 0 \\ \frac{p_{o_y} - p_{S_y}}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S\|^2} & -\frac{(p_{o_x} - p_{S_x})}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_S\|^2} & -1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

En la ecuación (18) se expresa la matriz Jacobiana  $\mathbf{J}_{o,s}$ , de dimensiones  $2 \times 4$ , que resulta de la primera derivada de la función  $\sigma_{o,s}$ . En la ecuación (19) se expresa la matriz pseudo inversa  $\mathbf{J}_{o,s}^\dagger$ , de dimensiones  $3 \times 2$ .

$$\mathbf{J}_{o,s}^\dagger = \begin{bmatrix} -\frac{p_{o_x} - p_{s_x}}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|} & -\frac{p_{o_y} - p_{s_y}}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|^2 + 1} \\ -\frac{p_{o_y} - p_{s_y}}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|} & -\frac{p_{o_x} - p_{s_x}}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|^2 + 1} \\ 0 & -\frac{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|^2}{\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_s\|^2 + 1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Las velocidades  $\mathbf{v}_{o,s}$  y  $\omega_{o,s}$ , para se expresan en la ecuación (20).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{o,s} \\ \omega_{o,s} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{o,s}^\dagger (\dot{\sigma}_{o,s} + \Lambda_{o,s} \tilde{\sigma}_{o,s}) \quad (20)$$

### 2.3.2 Composición de funciones

Los comportamientos, que se han definido por medio de las funciones de tareas, son muy elementales. Por ejemplo, el comportamiento de avance puede mover al robot pero no le da la capacidad de esquivar obstáculos. Los comportamientos se combinan para dar lugar a acciones de mayor relevancia.

#### A. Acción "Buscar al líder"

Para que el robot seguidor tenga la capacidad de moverse en busca del robot líder, en los casos en que no detecta su presencia, se combinan los comportamientos de avance y de esquivar obstáculos como se presenta en la ecuación (21). Las velocidades del avance se proyectan sobre el espacio nulo de las velocidades del comportamiento que esquiva obstáculos. Este último tiene la mayor prioridad.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{o,s} \\ \omega_{o,s} \end{bmatrix} + \mathbf{N}_{o,s} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_a \\ \omega_a \end{bmatrix} \quad (21)$$

#### B. Acción "Moverse en formación"

Para lograr que los robots seguidores se muevan manteniendo la formación  $(d, \phi)$ , se combinan los comportamientos de obtener formación y de esquivar obstáculos. El comportamiento de obtener formación tiene menor prioridad y se proyecta sobre el espacio nulo del que esquiva

obstáculos. Este último tiene la mayor prioridad. Esta combinación se presenta en la ecuación (22).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{o,s} \\ \omega_{o,s} \end{bmatrix} + \mathbf{N}_{o,s} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{L,s} \\ \omega_{L,s} \end{bmatrix} \quad (22)$$

## 3. RESULTADOS

Los experimentos de la formación líder seguidor se realizaron utilizando el ambiente de simulación MobileSim [7]. Los algoritmos están programados en Matlab y se utiliza una interfaz con Aria [7]. Se presentan dos diferentes simulaciones, en la primera la formación se presenta en un ambiente libre de obstáculos, mientras que en la segunda se tienen obstáculos en el espacio de trabajo.

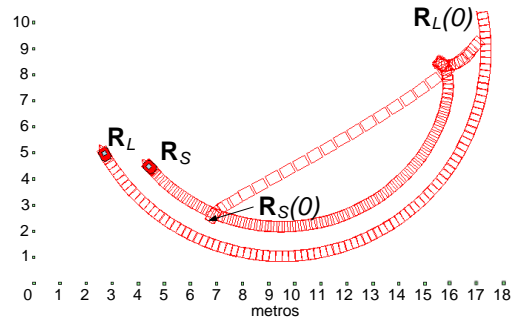


Figura 3. Dos robots en formación (1.5m, 30°).

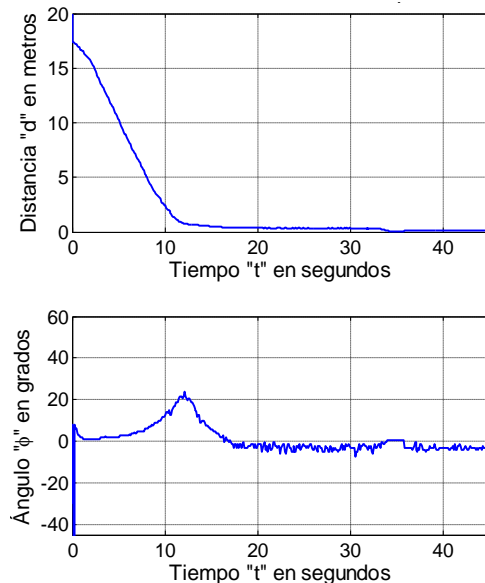


Figura 4. Comportamiento del error de los parámetros en la primera simulación.

En la figura 3 se muestran las trayectorias que siguen ambos robots durante la primera

simulación. El seguidor busca al líder y posteriormente se coloca en formación. El líder describe un arco de circunferencia. Se puede apreciar que durante la búsqueda del líder, la velocidad del seguidor es mayor que cuando están en formación. Los parámetros de la formación son:  $d = 1.5\text{m}$  y  $\phi = 30^\circ$ .

En la figura 4 se presenta el valor medido de los errores de los parámetros de la formación durante el movimiento. Se observa que conforme el seguidor se coloca mejor en la formación, ambos errores se aproximan a cero.

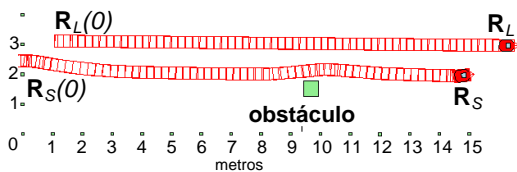


Figura 5. El robot seguidor esquiva un obstáculo.

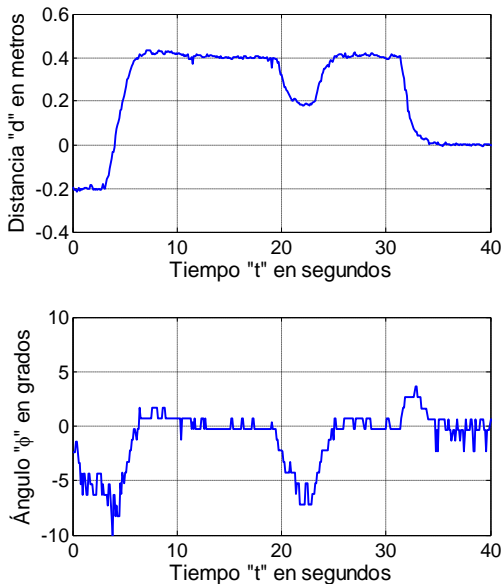


Figura 6. Comportamiento del error de los parámetros en la segunda simulación.

En la segunda simulación, se prueba el desempeño del control de formación en presencia de obstáculos, como se observa en la figura 5. La combinación de funciones permite que el robot seguidor modifique su trayectoria para esquivar el obstáculo que encuentra mientras sigue al líder de la formación.

En la figura 6, se aprecia que en  $t = 20$  segundos, el obstáculo es detectado y el robot seguidor cambia su orientación y su velocidad para esquivarlo.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado la ampliación del control por comportamientos basado en espacio nulo, incluyendo la orientación de los robots en el argumento de cada función de tareas. Se plantearon nuevas funciones de tareas que dependen de la configuración completa. Con estas funciones, se realiza una formación líder seguidor desde la perspectiva del control descentralizado. Los resultados de la simulación muestran la efectividad del diseño.

#### Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el otorgamiento de una beca para estudios de posgrado y al Comecyt por el apoyo brindado por medio del programa de apoyos a estudiantes de ciencia y tecnología.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Consolini et. al., "Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints". Automatica, Elsevier. vol. 44. pp. 1343-1349. 2008.
- [2] R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot". IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol. 2. No. 1. March 1986. pp. 14-23.
- [3] R. C. Arkin, "Motor Schema — Based Mobile Robot Navigation". The International Journal of Robotics Research. August 1989. 8: 92-112.
- [4] B. E. Bishop, "On the Use of Redundant Manipulator Techniques for Control of Platoons of Cooperating Robotic Vehicles". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. vol. 33. pp. 608-615. 2003.
- [5] G. Antonelli et, al., "The NSB control: a behavior-based approach for multi-robot systems". Paladyn, Journal of Behavioral Robotics. vol. 1. pp. 48-56. 2010.
- [6] B. Siciliano, "Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A tutorial". Journal of Intelligent and Robotic Systems. vol. 3. pp. 201-212. 1990.
- [7] Adept Mobile Robots, "Pioneer Robots SDK", Disponible en línea en: <http://www.mobilerobots.com/software/aria.aspx>; [Consultado el 2 de mayo de 2012].