

Collaborative event-triggered control for omnidirectional robots with obstacle avoidance

N. A. Tolentino-Medrano* M. Longinos-Garrido**
J. F. Guerrero-Castellanos*** J. Castañeda-Camacho †
and R. Álvarez-Gonzalez ‡

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla - FCE-BUAP,
Av. San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel,
Puebla, Pue. México.C.P. 72570

* *nestor.tolentino16@gmail.com* ** *longinos.200918526@gmail.com*

*** *fguerrero@ece.buap.mx* † *†jcastane@ece.buap.mx*

‡ *ricardo.alvarez@correo.buap.mx*

Abstract

In this paper, a collaborative event-triggered control strategy for a group of mobile agents is introduced. The communications between agents are asynchronous due to the event-triggered approach proposed. In this context, the agents broadcast their state information only when a specific condition is accomplished. The elements that compose the network consist of a set of omnidirectional (3,0) mobile robots. The event-triggered control strategy is designed to perform formations while avoiding collisions among them and against identified obstacles. Simulation results performed in MATLAB/Simulink of 10 omnidirectional vehicles are presented to corroborate that this control allows agents to reach the requested formation. Finally, a Montecarlo analysis is included to ensure the repeatability of the results.

Keywords: CPS, VCPS, VANET, mobile robot (3,0), event-triggered control, collaborative control, multi-agent system, collision avoidance.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas ciber-físicos (CPS) están basados en la integración de diferentes subsistemas como lo son los recursos computacionales y las comunicaciones con el propósito de adquirir variables físicas y ejercer una acción sobre ellas de acuerdo a Kim and Kumar (2012). Los sistemas ciber-físicos vehiculares (CPVS) son una sub-categoría de los CPS, los cuáles cuentan con procesos físicos que recaen en acciones como la locomoción, control, estabilidad, rendimiento, robustez y están estrechamente ligados con los vehículos autónomos como se ve en Bradley and Atkins (2015). Los CPVS pueden considerarse redes ad-hoc vehiculares (VANETs) si se comunican y colaboran con otros CPVS de la misma naturaleza según Basagni et al. (2004).

La apertura de nuevos retos en el mercado, como lo son la industria 4.0 y las ciudades inteligentes, ha generado necesidades y prospectos para explorar en áreas de redes vehiculares entre las que figuran aplicaciones industriales, usos militares, provisión de asistencia en situaciones de emergencia como recopilación de información sobre terrenos de difícil acceso para personas y para enviar provisiones como se ve en Noussaiba and Rahal (2017), Grocholsky et al. (2006). Por tanto, surge la necesidad de

trabajar con sistemas multi-agentes (MAS), que permitan a los elementos que los componen intercambiar entre ellos información de sus estados y de su dinámica para la ejecución de tareas coordinadas a través de una estrategia de control distribuida de acuerdo con Dignum (2009), Lewis et al. (2013).

Las comunicaciones en tiempo real entre VANETs usando una estrategia de control continua e incluso periódica no es totalmente conveniente debido principalmente al alto consumo de energía y recursos computacionales, así como retardos en la información, pérdida de paquetes de información, latencia de la red, etc. Por tal motivo, una estrategia de control que sea asíncrona y basada en eventos es ideal para implementar VANETs. El paradigma basado en eventos surge como una opción para reducir el uso del ancho de banda de las comunicaciones en el sistema en concordancia con Miskowicz (2015). Contrario al paradigma periódico, en el control basado en eventos la señal de control se calcula y actualiza en los actuadores solo cuando una condición específica se satisface, a esto se le denomina evento.

El interés en estudiar topologías de robots omnidireccionales surge en la necesidad de un mecanismo seguro, adaptativo y flexible, Ullrich (2015); Kraetzschmar et al.

(2014). A diferencia de los robots diferenciales tradicionales, los robots omnidireccionales son capaces de satisfacer exigencias en las industrias en cuanto a movimiento y facilidad en el diseño de estrategias de control, Shneier and Bostelman (2015) y Pawitan et al. (2016).

El presente artículo retoma las ideas puestas en Sánchez-Santana et al. (2018) y presenta una estrategia de control colaborativo y distribuido para la formación de un conjunto de robots móviles omnidireccionales. La propuesta consiste en desarrollar un algoritmo para que las comunicaciones entre agentes se realice de manera asíncrona, es decir, los agentes se comunicarán con sus vecinos (de acuerdo a la topología de la red), si y solo si, un evento ocurre. En ese sentido la propuesta de control entra en el contexto de control basado en eventos. Además, inspirándose del trabajo seminal de Olfati-Saber (2002) donde se asume que la comunicación entre agentes se lleva a cabo en tiempo continuo, la estrategia de control propuesta contempla el prevenir colisiones entre los propios robots móviles, así como obstáculos presentes en el ambiente. Debido a que se usa el modelo cinemático de los robots móviles omnidireccionales Guerrero-Castellanos et al. (2014), únicamente sus posiciones y orientación son necesarias en la estrategia de control, lo cual la hace relativamente fácil a implementar, cuestión sumamente necesaria en aplicaciones reales. Además, en este trabajo se asume que la topología de comunicación para el conjunto de vehículos es representada mediante un grafo conectado y no direccionado. Puesto que el artículo tiene la intención de mostrar la idea central, pruebas analíticas no son desarrolladas, no obstante un análisis de Montecarlo es llevado a cabo para mostrar la efectividad de la propuesta.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. La sección 2 presenta el modelo matemático de los robots móviles, un recordatorio sobre la teoría de grafos, así como definiciones importantes en el contexto de control basado en eventos. La sección 3 se dedica a explicar la estrategia de control, tanto para la comunicación entre agentes disparado por eventos, como la estrategia de evasión de obstáculos y colisiones entre vehículos. Los resultados en simulación utilizando un conjunto de diez vehículos son presentados en la sección 4. Finalmente las conclusiones y trabajos futuros son expuestas en la sección 5.

2. PRELIMINARES

2.1 Modelado matemático del robot móvil (3,0)

Como establecen Ullrich (2015) y Shneier and Bostelman (2015) el robot móvil (3,0) consiste en un vehículo holónimo que posee tres grados de libertad debido a las 3 ruedas omnidireccionales que le permiten desplazarse en cualquier dirección mediante la combinación de las velocidades de cada una de sus ruedas sin importar la orientación del robot. En la Figura 1 se muestra la repre-

sentación esquemática del robot (3,0) donde se establece el sistema coordenado inercial w y el sistema coordenado móvil m en el vehículo. Sean $\dot{\eta}_w = [\dot{x}_w \dot{y}_w \dot{\phi}_w]^T$ las velocidades lineales y angulares inerciales mientras $\dot{\eta}_m = [\dot{x}_m \dot{y}_m \dot{\phi}_m]^T$ son las velocidades lineales y angular del sistema móvil, tomando en consideración que el robot móvil tiene una estructura rígida con ruedas no deformables y no deslizantes con un solo momento sobre el plano horizontal que solo hace un punto de contacto entre la rueda y el plano, el modelo cinemático del robot (3,0) es:

$$\begin{aligned}\dot{x}_w &= \dot{x}_m \cos \phi_w - \dot{y}_m \sin \phi_w \\ \dot{y}_w &= \dot{x}_m \sin \phi_w + \dot{y}_m \cos \phi_w \\ \dot{\phi}_w &= \dot{\phi}_m\end{aligned}\quad (1)$$

En adición, el mapeo entre las velocidades angulares de las ruedas con la velocidad angular y lineal del sistema coordenado de un robot (3,0) se obtiene por:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_1 r &= \frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{x}_m + \frac{1}{2} \dot{y}_m + L \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_2 r &= -\dot{y}_m + L \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_3 r &= -\frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{x}_m + \frac{1}{2} \dot{y}_m + L \dot{\phi}_m\end{aligned}\quad (2)$$

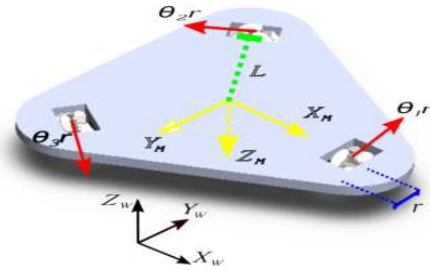


Figura 1. Ilustración del robot (3,0).

donde r es el radio de la rueda y L es la longitud desde la rueda hasta el centro del vehículo.

2.2 Teoría de grafos

El grafo $G = (V, E)$ representa el conjunto de elementos $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ llamados nodos y por el conjunto de bordes denotados por E . Un grafo bidireccional se dice que es uno no dirigido. La matriz de conectividad $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ es aquella en la cual sus elementos están dadas por $a_{ij} = 1$ si $(i, j) \in E$ y $a_{ij} = 0$ en caso contrario. La matriz D es diagonal y sus elementos d_i corresponden al conjunto de vecinos del nodo i denotados por $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E\}$. La diferencia entre la matriz diagonal y la matriz de conectividad resulta en la matriz laplaciana $L(G) = D - A$ siendo esta semi-definida positiva para grafos no dirigidos. La suma resultante de los elementos de cada fila de L es igual a cero. En consecuencia, el vector $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T \in \mathbb{R}^N$ es un eigenvalor asociado con $\lambda_1(G) = 0$, Lewis et al. (2013).

2.3 Comunicación disparada por eventos

Según Guerrero-Castellanos et al. (2019), un esquema disparado por eventos permite la comunicación de manera asíncrona entre agentes al integrar una función de evento $e_i : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$.

La función de evento para esta implementación se define por

$$e_{i,s} = \begin{cases} 1 & \text{if } |m_{i,s} - x_{i,s}| - \delta \geq 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (3)$$

donde $i \in V$, $s \in \{1, 2, 3\}$, $\delta > 0$ y se encuentra compuesta por el valor actual del nodo i , $x_{i,s}$ y una memoria $m_{i,s}$ del valor de $x_{i,s}$ la última vez que $e_{i,s}$ resultó en un valor positivo permitiendo así que i se comunique con j solo cuando ($e_{i,s} > 0$) y en caso contrario, que no se habilite la transmisión de información. Con base en la función de evento, un MAS cuenta con un control distribuido en donde el agente i usa sus propias variables de estado y la información obtenida por los agentes vecinos j que son almacenadas en las memorias m_i y m_j respectivamente, teniendo una forma $u = k(x_i, m_i, m_j)$.

3. DISEÑO DE UN CONTROL DISTRIBUIDO BASADO EN EVENTOS PARA ROBOTS MÓVILES

(3,0)

3.1 Definición del problema

Para implementar un MAS formado por robots móviles (3,0) es necesario tomar en cuenta aspectos del tráfico de la red para prevenir la pérdida de información, retardos, desfasamiento en los datos, etc. Dado el hecho de que se tratan de robots móviles es necesario tomar en cuenta el consumo energético, los recursos computacionales y las comunicaciones. Por ello, es necesario introducir un control asíncrono que permita tomar en consideración estos aspectos por lo que, se debe de encontrar una condición que determine el momento en el que cada agente necesita transmitir su estado a sus vecinos cercanos.

Considere $N(3, 0)$ como robots móviles conectados al grafo G con $V = \{1, 2, \dots, N\}$. Sean $x_i = (x_{i,1} \ x_{i,2} \ x_{i,3})^T \in \mathbb{R}^3$ las velocidades lineal y angular del sistema coordinado inercial $\{w\}$ y $u_i = (u_{i,1} \ u_{i,2} \ u_{i,3})^T \in \mathbb{R}^3$ las velocidades lineal y angular del sistema coordinado móvil $\{m\}$ con $i \in V$. A su vez, sean los vectores globales $\bar{x} = (x_{1,1} \ \dots \ x_{N,1} \ x_{1,2} \ \dots \ x_{N,2} \ x_{1,3} \ \dots \ x_{N,3})^T \in \mathbb{R}^{N*3}$ $\bar{u} = (u_{1,1} \ \dots \ u_{N,1} \ u_{1,2} \ \dots \ u_{N,2} \ u_{1,3} \ \dots \ u_{N,3})^T \in \mathbb{R}^{N*3}$ $\bar{m} = (m_{1,1} \ \dots \ m_{N,1} \ m_{1,2} \ \dots \ m_{N,2} \ m_{1,3} \ \dots \ m_{N,3})^T \in \mathbb{R}^{N*3}$ donde $m_{i,s}$ representa la memoria que guardia el valor de los estados del agente $x_{i,s}$ con $i \in V$ y $s \in \{1, 2, 3\}$. Entonces el modelo para el vehículo i dado su modelo de espacio de estados es denotado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,1} &= u_{i,1} \cos(x_{i,3}) - u_{i,2} \sin(x_{i,3}) \\ \dot{x}_{i,2} &= u_{i,1} \sin(x_{i,3}) + u_{i,2} \cos(x_{i,3}) \\ \dot{x}_{i,3} &= u_{i,3} \end{aligned} \quad (4)$$

El objetivo es integrar la función de evento $e_{i,s}$ para una función de control distribuido estático que permita a los elementos de V llegar a una referencia dada mediante el consenso de un agente de la red con un agente virtual mientras que el resto de agentes llegarán a una formación, evitando colisiones entre ellos y contra obstáculos.

3.2 Estrategia de control distribuido

Considere un MAS de N robots móviles (3,0) que interactúan de acuerdo al grafo no dirigido G . La función de control distribuido estático $u_i = k_i(x_i, m_i, m_j) \in \mathbb{R}^3$ se compone por:

$$u_i = M_i(u_i^c + u_i^\alpha + u_i^\beta) \quad (5)$$

donde u_i^c es el término de consenso, u_i^α es el término correspondiente a la evasión de colisiones entre agentes y u_i^β es el término de evasión de colisiones con obstáculos. Adicionalmente, M_i es una matriz de desacoplamiento para el vehículo móvil (3,0) dada por:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(x_{i,3}) & \sin(x_{i,3}) & 0 \\ -\sin(x_{i,3}) & \cos(x_{i,3}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 Consenso y formación

Considere un sistema multiagentes de N robots (3,0) representados por (4) los cuales interactúan de acuerdo al grafo G . La función de control distribuido estático vinculada con el consenso entre agentes se define por:

$$u_i^c = C_i + \Xi_i \quad (7)$$

con C_i siendo las variables de control que están establecidas por el consenso el cual es:

$$C_i = \begin{bmatrix} -\sum_{j \in N_i} (m_{i,1} - m_{j,1}) \\ -\sum_{j \in N_i} (m_{i,2} - m_{j,2}) \\ -\sum_{j \in N_i} (m_{i,3} - m_{j,3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

y se tiene Ξ como las distancias que mantendrán los agentes entre ellos tal que $\Xi = \xi_{((i,s),(j,s))} \in \mathbb{R} | \xi_{((i,s),(j,s))} > 0, i, j \in V$ y $s \in \{1, 2, 3\}$ y Ξ es una formación factible, el arreglo que representa este desfasamiento es:

$$\Xi_i = \begin{bmatrix} -\sum_{j \in N_i} \xi_{((i,1),(j,1))} \\ -\sum_{j \in N_i} \xi_{((i,2),(j,2))} \\ -\sum_{j \in N_i} \xi_{((i,3),(j,3))} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Permitiendo así poder realizar formaciones entre los N agentes con un desfasamiento entre ellos.

La función de evento que permite accionar el control distribuido del MAS, se define por:

$$e_i(x_i, m_i) = e_{i,1} \cup e_{i,2} \cup e_{i,3} \quad (10)$$

donde $e_{i,s}$ fue definida en (3).

3.4 Evasión de colisiones entre agentes

En Olfati-Saber (2006) se introduce un método para implementar un algoritmo de evasión de colisiones. Este algoritmo considera un comportamiento en “flocking” de los agentes que conforman el grupo. Cada nodo es considerado como un agente de segundo orden, usando los valores de sus posiciones para el término que previene las colisiones, mientras que las velocidades son utilizadas para el término que permite el consenso, sin embargo, en este trabajo los agentes son definidos como un sistema de primer orden y por tanto, el consenso es calculado usando también las posiciones y orientaciones de los vehículos. Los términos para la evasión de colisiones, según Olfati-Saber (2006), son u_i^α usado para evitar colisiones con sus vecinos y u_i^β que previene impactos con obstáculos en el área circundante. Ambos términos están basados en funciones potenciales atractivas/repulsivas que permiten calcular un término adicional cuando se puede dar una colisión. Los vehículos cercanos se denominan α -agentes los cuales, en consecuencia del enfoque basado en eventos, tienen un conjunto de posiciones previas $\hat{m}_j = (m_{j,1} \ m_{j,2})^T \in \mathbb{R}^2$ mientras que el conjunto de posiciones actuales del nodo son $\hat{m}_i = (m_{i,1} \ m_{i,2})^T \in \mathbb{R}^2$. Los nodos considerados como α -agentes son:

$$N_i = j \in V : \|\hat{m}_j - \hat{m}_i\| < r \quad (11)$$

donde r es el rango de interacción entre agentes. La ley de control introducida para la evasión de colisiones con α -agentes es:

$$u_{i,s}^\alpha = c_\alpha \sum_{j \in N_i} \phi_\alpha(\|\hat{m}_j - \hat{m}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} \quad (12)$$

donde la norma sigma $\|z\|$ de la matriz z es calculada por:

$$\|z\|_\sigma = \frac{1}{\epsilon} [\sqrt{1 + \epsilon \|z\|^2} - 1] \quad (13)$$

además $c_\alpha > 0$ y \hat{n}_{ij} es un vector definido como:

$$\hat{n}_{ij} = \frac{\hat{m}_j - \hat{m}_i}{\sqrt{1 + \epsilon \|\hat{m}_j - \hat{m}_i\|}} \quad (14)$$

con $\epsilon > 0$. El término ϕ_α es una función de acción para $z = \|\hat{m}_j - \hat{m}_i\|$ que se desvanece siempre que los α -agentes se encuentran lo suficientemente lejos el uno del otro. La función de acción se define como:

$$\phi_\alpha = \rho_h(z/r_\alpha) \phi(z - d_\alpha) \quad (15)$$

donde $\rho_h(z)$ es una función “bump” que consiste en una función escalar que varía suavemente desde 0 a 1 y se define por:

$$\rho_h(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, h) \\ \frac{1}{2}[1 + \cos(\pi \frac{z-h}{1-h})] & z \in [h, 1] \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (16)$$

y $\phi(z)$ es una función sigmoideal desigual definida por:

$$\phi(z) = \frac{1}{2}[(a+b)\sigma_1(z+c) + (a-b)] \quad (17)$$

donde:

$$\sigma_1 = z/\sqrt{1+z^2} \quad (18)$$

con $0 < a \leq b, c = a - b/\sqrt{4ab}$ y donde $r_\alpha = \|r\|_\sigma$ y $d_\alpha = \|d\|_\sigma$ son la σ -norma del radio r y de la distancia d entre los agentes respectivamente. El valor d se obtiene con:

$$d = \|\hat{m}_j - \hat{m}_i\| \quad (19)$$

3.5 Evasión de colisiones con obstáculos

Para la evasión de obstáculos, cada vez que el vehículo i está cerca de los obstáculos O_k un término adicional será agregado a la ley de control (9). Los obstáculos serán considerados como círculos o paredes infinitas y estos serán considerados como β -agentes en los límites del obstáculo O_k con sus estados denotados como $\hat{x}_{i,k} \in \mathbb{R}^2$ donde esta posición satisface $\hat{x}_{i,k} = \operatorname{argmin}_{y \in O_k} \|y - \hat{x}_i\| = (x_{i,1,k} \ x_{i,2,k})^T \in \mathbb{R}^2$ con y siendo parte del área O_k . Sea $V_k = \{1', 2', \dots, n'\}$ el conjunto de nodos que representa a los β -agentes y los β -vecinos del nodo $i \in V$ son:

$$N_i^\beta = \{k \in V_k : \|\hat{x}_{i,k} - \hat{m}_i\| < r'\} \quad (20)$$

donde $r' > 0$ y representa el rango de interacción entre el nodo i y los β -agentes. El término correspondiente para la evasión de colisiones con obstáculos es:

$$u_{i,s}^\beta = c_\beta \sum_{k \in N_{i,k}} \phi_\beta(\|\hat{x}_{i,k} - \hat{m}_i\|_\sigma) \hat{n}_{i,k} \quad (21)$$

con $c_\beta > 0$ y

$$\hat{n}_{i,k} = \frac{\hat{x}_{i,k} - \hat{m}_i}{\sqrt{1 + \epsilon \|\hat{x}_{i,k} - \hat{m}_i\|}} \quad (22)$$

La función de acción ϕ_β para el β -agentes:

$$\phi_\beta(z) = \rho_h(z/r_\beta)(\sigma_1(z - d_\beta) - 1) \quad (23)$$

donde $\sigma_1(z)$ es presentado en (17), $\rho_h(z)$ en (15), $r_\beta = \|r'\|_\sigma$ y $d_\beta = \|d'\|$ donde:

$$d' = \|\hat{x}_{i,k} - \hat{m}_i\| \quad (24)$$

4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Para implementar el control propuesto, se consideran 10 nodos VANETs conectados de acuerdo al grafo de la Figura 2. Cada nodo consiste en un robot móvil (3,0)

y mantiene una distancia de 1m con respecto sus vecinos. La simulación se efectúa usando Matlab/Simulink y comienza con un conjunto aleatorio de posiciones iniciales para los 10 VANETs que corresponden a los valores de la Tabla 1. Un obstáculo previamente definido con un radio de seguridad de $r_b = 0,6$ es introducido en el origen. Los agentes cuentan con un radio de seguridad de $r_a = 0,85$. Para la activación de los eventos, se tiene un umbral de error $\delta = 0,03$. Se introduce un líder virtual, que hace consenso únicamente con el nodo 1 para que este llegue a una referencia de $x_{i,1} = -0,5m$ y $x_{i,2} = -1,5m$, mientras los demás nodos mantienen su formación correspondiente respecto este punto. La simulación se ejecuta por 15 segundos con un tiempo de 0.01 segundos para cada iteración.

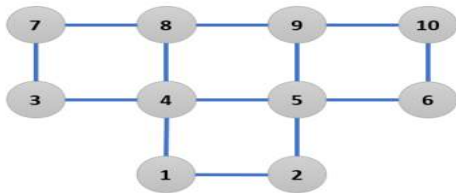


Figura 2. Grafo no dirigido de los 10 VANETs.

Tabla 1. Condiciones iniciales de las posiciones

nodo	$x_{i,1}$	$x_{i,2}$	nodo	$x_{i,1}$	$x_{i,2}$
1	-1.59	-1.2	6	1.14	-1.81
2	-1.37	-1.65	7	-0.45	0.43
3	-0.35	1.74	8	-1.88	0.19
4	0.24	-0.96	9	0.34	-1.62
5	-0.93	-1.19	10	0.23	0.55

En la Figura 3 y en la Figura 4 se presenta la evolución de las variables $x_{i,1}$ y $x_{i,2}$, con el transcurso del tiempo, alcanzando la formación propuesta como se muestra en la Figura 5 donde los puntos azules representan las posiciones iniciales de los 10 nodos en una gráfica XY mientras que los rojos indican sus posiciones finales y cada línea de color representa la ruta que tomó cada nodo para alcanzar su posición final. Adicionalmente, la Figura 6 compara los eventos que fueron disparados en cada nodo durante la simulación, mientras que la línea de “control continuo” representa la cantidad de veces que la comunicación sería realizada durante el proceso si la estrategia de control fuera continua y no basada en eventos, cambiando únicamente la condición de activación y calculando el control con los valores actuales de las posiciones de los agentes, contrastando así el control basado en eventos y sin eventos.

A su vez se llevó a cabo un análisis de Montecarlo de 30 simulaciones con 50 segundos de duración usando un conjunto de posiciones iniciales generadas aleatoriamente con una distribución normal uniforme en un rango de -2m a 2m para los valores tanto de $x_{i,1}$ y como de $x_{i,2}$, y se calcularon los promedios y desviaciones estándar de la norma del error, siendo esta $|e| = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2}$, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 7.

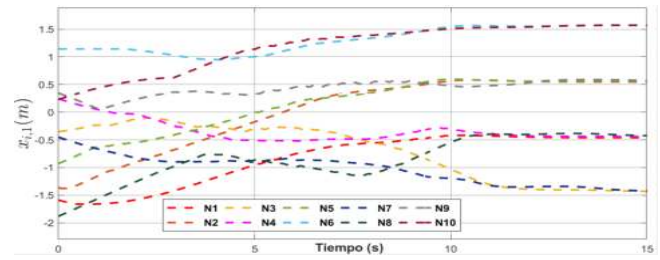


Figura 3. Posición $x_{i,1}$ de los nodos.

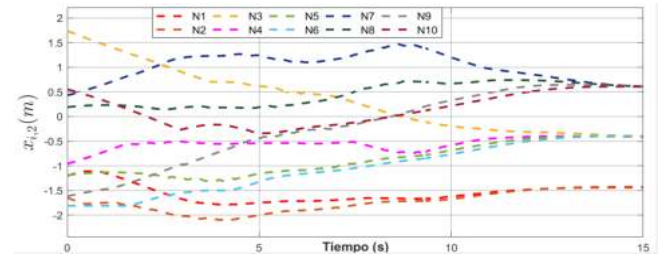


Figura 4. Posición $x_{i,2}$ de los nodos.

Finalmente se presenta en video¹ simulación de los 10 robots móviles y el obstáculo usando el módulo de Simulink VR sink para mostrar que los agentes no colisionen entre ellos ni con el obstáculo ubicado en el origen de acuerdo a los parámetros establecidos.

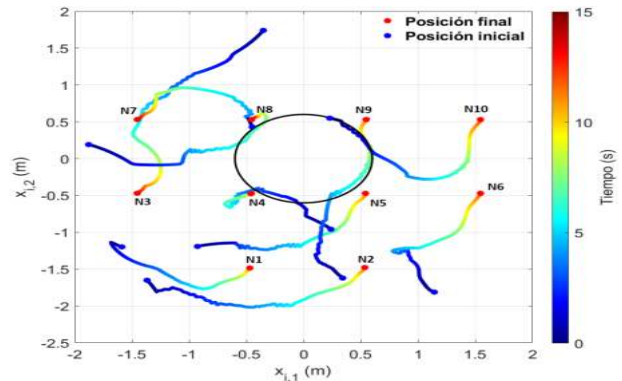


Figura 5. Trayectoria de los nodos en el plano XY.

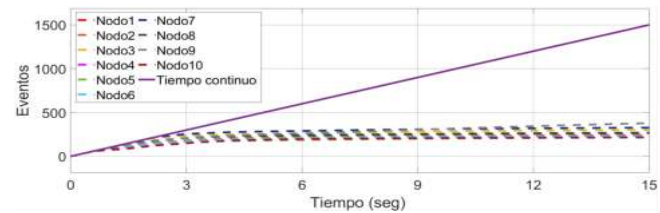


Figura 6. Eventos acumulados de cada nodo.

¹ <https://drive.google.com/file/d/125674VrqSzUHXYkzP6sJuRtmvIbCeah/view?usp=drivesdk>

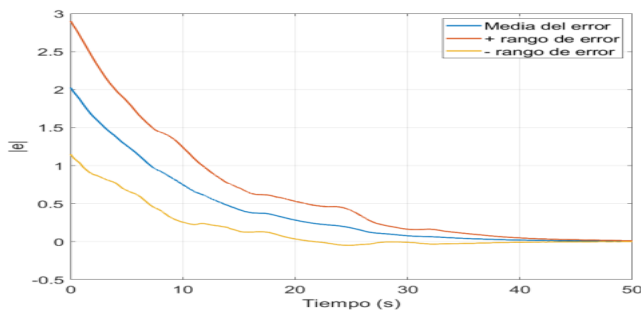


Figura 7. Promedio de la norma del error de la posición de los agentes con análisis Montecarlo.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una estrategia de control distribuido disparado por eventos para un conjunto de robots móviles omnidireccionales. Se planteó que el control de cada agente se compone por 3 términos, el primero para que un nodo realizara consenso con agente virtual mientras que los demás nodos realizaban una formación respecto a este, el segundo para prevenir colisiones contra otros agentes y el tercero para evitar colisiones contra obstáculos identificados en el área circundante. Se llevó a cabo la simulación de este control para un grupo de 10 agentes modelados como robots (3,0) y un obstáculo previamente identificado, mostrando que los agentes lograron posicionarse en los puntos deseados para crear la formación propuesta. En el futuro se planea implementar en tiempo real la propuesta.

REFERENCIAS

- Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., and Stojmenovic, I. (2004). Mobile ad hoc networking. URL <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10114079>. Electronic reproduction, Somerset, New Jersey : Wiley InterScience.
- Bradley, J.M. and Atkins, E.M. (2015). Optimization and control of cyber-physical vehicle systems. *Sensors*, 15(9), 23020–23049.
- Dignum, V. (2009). *Handbook of research on multi-agent systems: semantics and dynamics of organizational models*. Information Science Reference Hershey.
- Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, V., and Pappas, G. (2006). Cooperative air and ground surveillance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 16–25.
- Guerrero-Castellanos, J., Vega-Alonzo, A., Durand, S., Marchand, N., Gonzalez-Diaz, V., Castañeda-Camacho, J., and Guerrero-Sánchez, W. (2019). Leader-Following Consensus and Formation Control of VTOL-UAVs with Event-Triggered Communications. *Sensors*, 19(24), 1–26.
- Guerrero-Castellanos, J., Villarreal-Cervantes, M., Sánchez-Santana, J., and Ramírez-Martínez, S. (2014). Seguimiento de trayectorias de un robot móvil (3,0) mediante control acotado. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 11(4), 426–434. doi:10.1016/j.riai.2014.09.005.
- Kim, K.D. and Kumar, P.R. (2012). Cyber physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of the IEEE*, 100, 1287–1308. doi:10.1109/JPROC.2012.2189792.
- Kraetzschmar, G.K., Hochgeschwender, N., Nowak, W., Hegger, F., Schneider, S., Dwiputra, R., Berghofer, J., and Bischoff, R. (2014). Robocup@work: Competing for the factory of the future. In R.A.C. Bianchi, H.L. Akin, S. Ramamoorthy, and K. Sugiura (eds.), *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII [papers from the 18th Annual RoboCup International Symposium, João Pessoa, Brazil, July 15, volume 8992 of Lecture Notes in Computer Science, 171–182*. Springer. doi:10.1007/978-3-319-18615-3_14.
- Lewis, F.L., Zhang, H., Hengster-Movric, K., and Das, A. (2013). *Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches*. Springer Science & Business Media.
- Miskowicz, M. (2015). *Event-Based Control and Signal Processing*. CRC Press.
- Noussaiba, M. and Rahal, R. (2017). State of the art: Vanets applications and their rfid-based systems. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 0516–0520. IEEE.
- Olfati-Saber, R. (2002). Global configuration stabilization for the vtol aircraft with strong input coupling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(11), 1949–1952. doi:10.1109/TAC.2002.804457.
- Olfati-Saber, R. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51, 401–420. doi:10.1109/TAC.2005.864190.
- Pawitan, G.A.H., Mutijarsa, K., and Adiprawita, W. (2016). Three-wheeled omnidirectional robot controller implementation. In *2016 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, 1–4. IEEE.
- Sánchez-Santana, J., Guerrero-Castellanos, J., Villarreal-Cervantes, M., and Ramirez-Martinez, S. (2018). Control distribuido y disparado por eventos para la formación de robots móviles tipo (3, 0). In *Congreso Nacional de Control Automático*, volume 2017.
- Shneier, M. and Bostelman, R. (2015). Literature review of mobile robots for manufacturing. doi:10.6028/nist.ir.8022.
- Ullrich, G. (2015). Automated guided vehicle systems.