

ARTÍCULO ACEPTADO

Algunos resultados de control distribuido de múltiples robots

Héctor M. Becerra, Miguel A. Trujillo, David Gómez Gutiérrez y Javier Ruiz León

Introducción

Actualmente, existe un gran interés en la comunidad de robótica en el diseño y análisis de sistemas donde un conjunto de robots interactúa, se coordina o coopera para realizar una tarea compleja sin la necesidad de un coordinador central. Esto proporciona robustez y redundancia para realizar la tarea, o incluso permite realizar tareas que no son posibles con un solo robot.

Un ejemplo popular de un sistema multi-robot (SMR) es un espectáculo luminoso, como el que recientemente se ha presentado por diferentes compañías utilizando una gran cantidad de cuadricópteros, donde cada uno es un pixel de una animación. Sin embargo, estos espectáculos son una *cuidadosa coreografía* donde las posiciones de los robots y sus trayectorias son determinadas a priori. Una desventaja de los sistemas centralizados como éste es que la tarea no puede desempeñarse si el sistema central falla.

Para abordar esta problemática, la comunidad de robótica y control automático trabaja en el diseño de algoritmos de control *distribuido* de formaciones, donde cada robot cuenta con una ley de control para lograr la formación mediante la interacción entre los robots; por ejemplo, ajustando su posición con base en las posiciones relativas de sus vecinos sin la necesidad de un sistema central. El control distribuido de formaciones de un SMR es importante en aplicaciones como inspección de estructuras, cinematografía o captura de un escenario dinámico, monitoreo de grandes áreas para acciones de rescate, y transporte cooperativo de un objeto.

El análisis y diseño de control distribuido para un SMR frecuentemente utiliza dos componentes [5]: un grafo de comunicación que describe (para cada robot) cuales agentes influyen de manera directa en su comportamiento, y un algoritmo matemático que determina cómo los robots deben ajustar su comportamiento basados en la información que reciben de los robots vecinos. El lector puede consultar [3,6] para una revisión detallada de la literatura reciente en control de formaciones.

Uno de los métodos básicos en el diseño de controladores para un SMR es un algoritmo de *consenso*, el cual permite que los agentes en un sistema distribuido logren un acuerdo sobre una variable de interés. Esto es posible cuando el grafo de comunicación es un grafo conectado; es decir, la información puede fluir entre cualquier par de agentes. De esta manera, el SMR logra un comportamiento global a partir de interacción local, lo cual tiene

una inspiración biológica, por ejemplo, en el comportamiento de bandadas de aves.

En el control de formaciones basado en consenso, frecuentemente se utilizan *agentes virtuales* y se define la formación de tal manera que, si se logra consenso en las coordenadas de los agentes virtuales, se logra la formación, como se ilustra en la Figura 1.

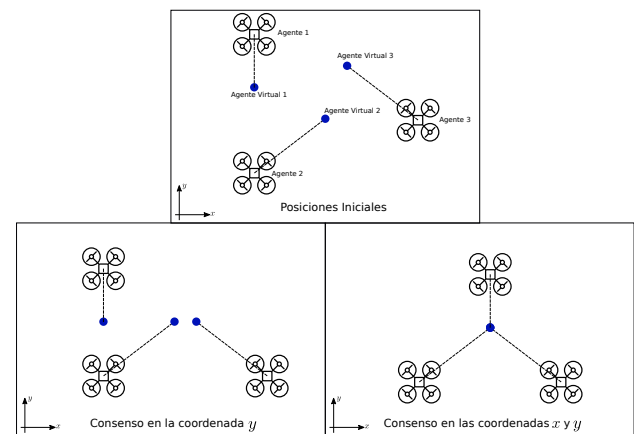


Figura 1. Formación que se obtiene a partir del consenso de agentes virtuales.

Existen varios retos para la aplicación del control de formaciones. El objetivo de este artículo es presentar soluciones para algunos de ellos, por ejemplo, evitar que los robots colisionen con objetos del ambiente, o incluso con otros robots. Se considerarán robots cuadricópteros y robots de ruedas como agentes. Una opción para que un SMR logre una formación evitando colisiones es mediante un control jerárquico basado en tareas. Este permite combinar diferentes controladores sin conmutar de uno a otro de forma discontinua. Otro reto del control de formaciones es mantener la conectividad entre agentes, lo cual se puede incorporar como una restricción de un control basado en optimización. A continuación se describen soluciones a estos retos de interés en el área.

Control de formaciones sin líder

En el control de formaciones hay dos casos, dependiendo de si uno de los robots tiene la función de ser un líder o si ninguno actúa como tal. En el caso sin líder, el objetivo es que los robots alcancen una forma geométrica predefinida, donde lleguen a *posiciones relativas* especificadas en la formación deseada sin importar la posición

global de la misma. En contraparte, la función del líder es que el SMR pueda navegar en un entorno y realizar tareas bajo su guía, por lo que el líder impone una posición global para la formación. En la práctica, el control de un SMR debe considerar resolver dos tareas (posiblemente conflictivas), lograr la formación deseada y evitar colisiones.

Existe en la literatura un algoritmo matemático basado en la combinación de múltiples tareas [1] que permite a un robot cumplir con dos tareas al mismo tiempo. Cada una de las tareas encargadas de alcanzar los objetivos establecidos tiene una jerarquía preestablecida. En el control de formaciones con evasión de colisiones, la tarea principal es evitar colisiones, mientras que la tarea secundaria es alcanzar la formación especificada [7].

Algo que se debe de evitar en los esquemas de combinación de múltiples tareas son las discontinuidades en las entradas de control (velocidades de los robots) debido al cambio de prioridad, ya que ante cambios abruptos de velocidad, los robots son incapaces de realizar las acciones de control necesarias para cumplir con sus objetivos. Para evitar este problema, se incluye una función de transición suave entre leyes de control.

Algoritmos de control de formaciones se han evaluado utilizando el simulador dinámico Gazebo para un grupo de 7 cuadricópteros. El esquema de control distribuido para cada cuadricóptero recibe información de la posición de los robots vecinos para calcular el error de consenso de agentes virtuales y calcular velocidades proporcionales a este error. Se utiliza un modelo de movimiento simplificado del cuadricóptero, considerando que se controlan las posiciones (x, y, z) y que las entradas de control son las velocidades de traslación lineal en cada coordenada, así que el modelo es un integrador simple.

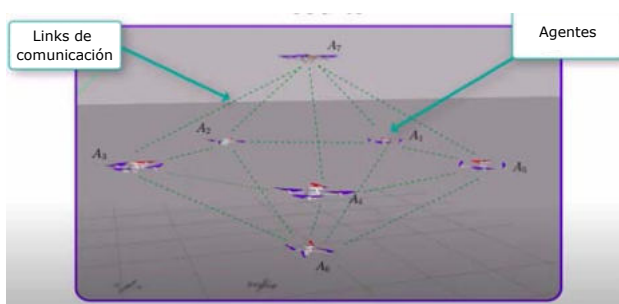


Figura 2. Grafo de comunicación y formación deseada para 7 cuadricópteros.

En la Figura 2 se muestra la red de comunicación entre cada uno de los agentes móviles representados por los 7 cuadricópteros en la formación deseada. Las trayectorias de cada uno de los robots desde una posición inicial a una final se presentan en la Figura 3, donde los cuadricópteros alcanzan la formación evitando colisiones con

los obstáculos fijos (columnas cilíndricas) que se encuentran en el espacio de trabajo y con los demás robots.

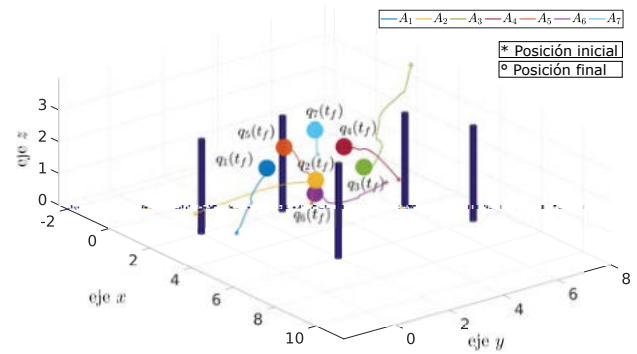


Figura 3. Trayectorias de los agentes para alcanzar la formación especificada evitando colisiones.

El algoritmo que se detalla en [7] también permite realizar la evasión de obstáculos irregulares. La Figura 4 muestra las trayectorias de 5 robots desde su posición inicial hasta alcanzar una formación en pentágono, logrando evitar colisiones con los obstáculos del entorno, los cuales en la figura se muestran como polígonos en líneas gruesas. Se define un radio de seguridad para cada agente (circunferencias punteadas en la figura), el cual no debe ser traspasado por ningún obstáculo. Las leyes de control (velocidades de traslación en x, y) se mantienen continuas mientras se alcanza la formación deseada.

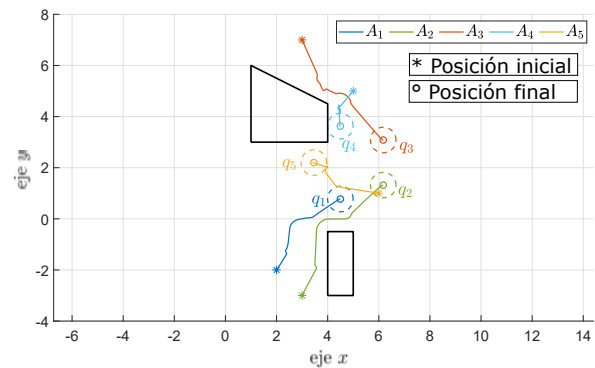


Figura 4. Trayectorias de los agentes realizando evasión de colisiones con obstáculos irregulares.

Control de formaciones con líder

En esta sección se describe un trabajo desarrollado para robots terrestres tipo unicyclo [4], para el caso en que uno de los robots actúa como líder. Este tipo de robots se caracteriza por tener restricciones de movimiento similares a las de un carro convencional que no se puede desplazar lateralmente, pero a diferencia de un carro, son capaces de girar en sitio sobre su propio eje.

Consideramos un grupo de robots tipo uniclo, todos caracterizados por el mismo modelo de movimiento y que cada robot cuenta con un controlador de posición (x, y) mediante entradas de velocidad de traslación y rotación. Uno de los robots, quien actúa como líder, conoce una trayectoria de referencia, que es una secuencia de posiciones deseadas para cada instante de tiempo. El resto de robots del grupo inician en posiciones arbitrarias y el SMR debe realizar tres tareas: a) el robot líder debe converger a la trayectoria de referencia y seguirla hasta que la misma termina; b) el resto de robots deben seguir al líder en formación; c) cada uno de los robots del grupo, incluyendo el líder, debe evitar colisiones entre ellos o con obstáculos fijos del entorno. Estas tareas se pueden integrar en un esquema de control distribuido basado en prioridades que calcula las velocidades de cada robot tomando en cuenta la posición que le comunican los robots vecinos de acuerdo a la conectividad de la red de robots.

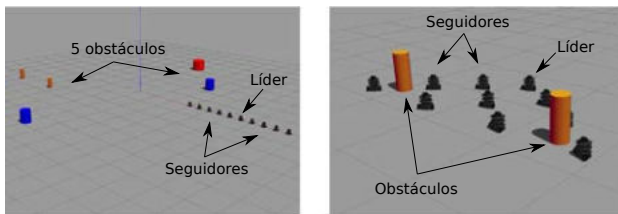


Figura 5. Configuración inicial de un grupo de 10 robots y convergencia a la formación deseada.

Se ha evaluado en simulación un control de seguimiento de trayectoria en formación utilizando el software Gazebo con un grupo de 10 robots y 5 obstáculos circulares de diferentes radios, como se muestra en la imagen de la izquierda en la Figura 5. Los robots inician alineados y al ejecutar el control distribuido el líder empieza a seguir una trayectoria en círculo y los demás alcanzan la formación deseada como se muestra en la imagen de la derecha en la Figura 5. Se observa que el grupo de robots puede lidiar con los obstáculos del entorno realizando evasiones cuando es necesario; después de un periodo transitorio de la tarea de evasión, los robots regresan a su movimiento de formación, ya que se utiliza un esquema multitareas (como el que se describió en la sección previa).

El esquema de control también se ha evaluado mediante experimentos con un grupo de 3 robots reales, un robot Pioneer 3DX que fungió como líder, dos Turtlebots 2 como seguidores y un obstáculo en el entorno. En estos resultados, la formación deseada es un triángulo y el grafo de comunicación considera que cada robot tiene comunicación con los otros dos. Cada robot se conectó por medio de WiFi a una computadora donde se calcularon los comandos de velocidad de forma distribuida usando el Sistema Operativo Robótico (ROS, por sus siglas en inglés). La posición de cada robot y del obstáculo se obtuvieron mediante un sistema de captura de movimien-

to Optitrack, un sistema de 12 cámaras que mediante triangulación es capaz de ubicar una serie de marcadores reflejantes montados en los robots y en el obstáculo. La Figura 6 muestra algunas tomas del entorno con los robots moviéndose en formación. También se muestran algunas posiciones intermedias durante el seguimiento de la trayectoria, en particular durante la evasión del obstáculo, lo cual causa que los 3 robots se desvíen para después recuperar la trayectoria deseada.

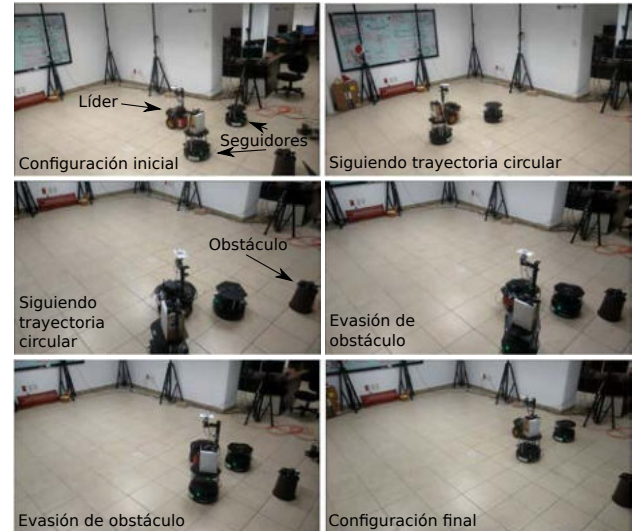


Figura 6. Experimento de seguimiento en formación con tres robots y un obstáculo.

Control de formaciones basado en optimización

La teoría de consenso también se puede utilizar en un esquema de control basado en optimización. Uno de los esquemas de control más populares que se basan en optimización es el Control Predictivo basado en Modelo [2] (MPC, por sus siglas en inglés). Como su nombre lo indica, el MPC requiere de una representación matemática del sistema (modelo) para simularlo a lo largo de un horizonte de tiempo y predecir su evolución, para entonces corregir las desviaciones que se generen respecto a una referencia de acuerdo a la solución de un problema de optimización en el que se quiere minimizar una función de costo. En esta sección se describe el control de formaciones de un grupo de cuadricópteros basado en MPC. Para resolver este problema de forma distribuida se plantea en [8] un esquema donde el control para cada cuadricóptero se resuelve de forma independiente en una computadora distinta de acuerdo a la Figura 7.

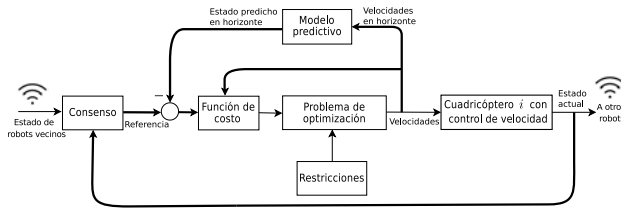


Figura 7. Diagrama de control basado en MPC.

Un modelo de integrador simple representa el movimiento en cada coordenada de posición (x, y, z) y se usa como modelo predictivo. El esquema de control de cada cuadricóptero recibe información de la posición y velocidad de los robots vecinos para calcular el valor de consenso y usarlo como referencia del consenso estimado por el modelo predictivo. La función de costo considera un término de error de consenso y un término de las entradas de control, los cuales se desean minimizar a lo largo de un horizonte de tiempo. Una gran ventaja del MPC es la facilidad de introducir restricciones para la solución del problema de optimización, lo cual permite resolver varias tareas simultáneamente: a) lograr la formación deseada; b) evitar colisiones entre agentes y con obstáculos fijos en el entorno; c) mantener la conectividad de comunicación de acuerdo a lo especificado en la configuración inicial; y d) limitar las velocidades máximas a un rango específico. Las restricciones de evasión y conectividad se pueden manejar de forma similar utilizando la posición relativa (distancia) entre agentes o a los obstáculos. Para la evasión, no debe ser menor a un valor predefinido; para la conectividad, no debe exceder el alcance de la comunicación entre agentes.

Un esquema basado en MPC se ha evaluado en experimentos con un grupo de tres cuadricópteros Bebop 2 considerando lo siguiente. Cada cuadricóptero cuenta con un control de velocidad interna que recibe como entrada la velocidad deseada generada por el control de alto nivel de formación basado en MPC. Cada uno de los agentes se comunica con los otros dos, enviando su posición, obtenida mediante un sistema de captura de movimiento, así como la velocidad calculada por el algoritmo MPC. El problema de optimización del MPC se resuelve de manera distribuida en una computadora independiente para cada agente. Esto se realiza debido a que el poder de cómputo sobre los cuadricópteros es limitado, por lo que se envían los comandos de velocidad calculados en las computadoras vía WiFi y usando el driver de ROS `bebop_autonomy`. Cada computadora resuelve un problema de optimización que se expresa de forma cuadrática para garantizar la existencia de una solución. En los esquemas basados en MPC es importante el parámetro referente al horizonte de predicción, un valor grande resulta en un mejor desempeño pero se incrementa el costo computacional. Experimentalmente se determinó un horizonte de 15 iteraciones, con lo que fue

posible manejar un periodo de muestreo de 0.1 segundos por iteración. En la Figura 8 se presentan algunas tomas de un experimento con un obstáculo en forma de columna. Los cuadricópteros deben alcanzar una formación en triángulo. Desde la configuración inicial, el agente C_1 avanza evadiendo el obstáculo, mientras que C_3 retrocede. El agente C_2 se mantiene en el mismo lugar sin control, con el objetivo de que actúe como una ancla para la formación y que ésta se mantenga en el área de detección. En la última imagen se observa que los tres cuadricópteros alcanzan la formación en triángulo.

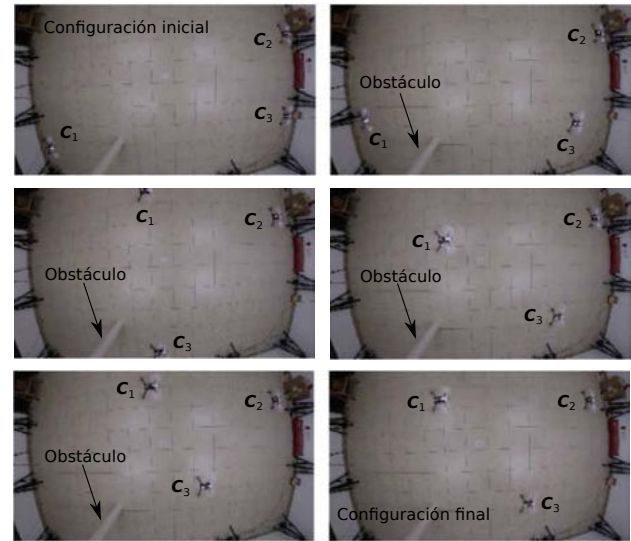


Figura 8. Experimento de formación con evasión de obstáculos y mantenimiento de conectividad.

Conclusiones

El control de sistemas multi-robot es de gran utilidad para diversas aplicaciones en las que un grupo de robots resuelven una tarea de forma más eficiente o que no es posible resolver por un solo robot. En este trabajo se ilustra cómo el uso de la teoría de consenso en el control de sistemas multi-robot permite alcanzar formaciones previamente especificadas, donde cada uno de los robots se controla de forma distribuida únicamente mediante información local. Se utiliza un esquema multi-tarea jerárquico para alcanzar una formación y evitar colisiones entre robots o con objetos del entorno. Extendiendo el uso de la teoría de consenso, se muestran resultados de seguimiento de un líder. Con el objetivo de facilitar la introducción de otras restricciones, como mantener la conectividad del grafo de comunicación mientras se evitan colisiones, se utiliza la teoría de consenso en combinación con control predictivo basado en modelo.

Como trabajo a futuro se considera el control de formaciones flexibles para la navegación en espacios reducidos con evasión de obstáculos irregulares, así como lograr la formación cuando el grafo de comunicación varía de manera dinámica, y así relajar la condición de

que el grafo de comunicación deba ser conectado en todo momento. También se está trabajando en el desarrollo de algoritmos para lograr la formación especificada cumpliendo con restricciones de tiempo.*

REFERENCIAS

1. Antonelli, G., Arrichiello, F., y Chiaverini, S. (2009). Experiments of formation control with multirobot systems using the null-space-based behavioral control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(5), 1173-1182.
2. Camacho, E., Bordons, C., y Alba, C. (2004). Model Predictive Control. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London.
3. Kamel, M.A., Yu, X., y Zhang, Y. (2020). Formation control and coordination of multiple unmanned ground vehicles in normal and faulty situations: A review. *Annual Reviews in Control*, 49, 128-144.
4. Martínez, J.B., Becerra, H.M., y Gómez-Gutiérrez, D. (2021). Formation tracking control and obstacle avoidance of unicycle-type robots guaranteeing continuous velocities. *Sensors*, 21(13), 4374.
5. Mesbahi, M., y Egerstedt, M. (2010). Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks. Princeton Series in Applied Mathematics.
6. Oh, K.K., Park, M.C., y Ahn, H.S. (2015). A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 53, 424-440.
7. Trujillo, M.A., Becerra, H.M., Gómez-Gutiérrez, D., y Ruiz-León, J. (2021). Hierarchical task-based formation control and collision avoidance of UAVs in finite time. *European Journal of Control*, 60, 48-64.
8. Vargas, S., Becerra, H.M., y Hayet, J.B. (2022). MPC-based distributed formation control of multiple quadcopters with obstacle avoidance and connectivity maintenance. *Control Engineering Practice*, 121, 105054.

SOBRE LOS AUTORES



Héctor M. Becerra obtuvo el grado de doctor en Ing. de Sistemas e Informática por la U. de Zaragoza, España en 2011. Actualmente labora como investigador en el Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT-Guanajuato y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Sus intereses de investigación incluyen aplicaciones de teoría de control en robótica, para robots de ruedas, humanoides y vehículos aéreos, así como el control de sistemas de múltiples agentes.



Miguel Angel Trujillo Jacobo obtuvo el grado de doctor en en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en CINVESTAV, Unidad Guadalajara en 2021. Actualmente es profesor del Tecnológico de Monterrey, Campus Zapopan. Sus intereses científicos incluyen el control de sistemas multi-agente y navegación de sistemas multi-robot en espacios estrechos.



David Gómez Gutiérrez obtuvo el grado de doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en Cinvestav, Unidad Guadalajara en 2013. Es investigador en robótica en Intel Labs, Intel Corporation, miembro del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Zapopan y miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Sus intereses científicos incluyen la navegación autónoma de robots, los sistemas multi-agentes y el control robusto.



Javier Ruiz León obtuvo el grado de doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Técnica Checa, Praga, República Checa en 1996. Actualmente es Profesor-Investigador en la Unidad Guadalajara del CINVESTAV y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Sus principales intereses de investigación son teoría de sistemas lineales, sistemas híbridos y control y formación de sistemas multi-agentes.