

Sistema de transporte cooperativo desarrollado para un grupo de robots móviles no-holonómicos usando el método Líder Virtual

LEONARDO ENRIQUE SOLAQUE GUZMÁN ⁽¹⁾, DANIEL RICARDO AVENDAÑO FLÓREZ ⁽²⁾,
MANUEL ALEJANDRO MOLINA VILLA ⁽³⁾, CAMILO ANDRÉS PULIDO ROJAS ⁽⁴⁾

(1) leonardo.solaque@unimilitar.edu.co

(2) daniellpu9@outlook.com

(3) mmolina2127@hotmail.com

(4) camilopulidorojas@gmail.com

Universidad Militar Nueva Granada, UMNG
Bogotá, Colombia

Sistema de Transporte Cooperativo Desarrollado Para un Grupo de Robots Móviles No-Holonómicos Usando el Método Líder Virtual

ABSTRACT

Keywords:

Control Systems; Cooperative Robotics; Mobile Robotics; Decentralized Control; Leader-follower; Virtual-leader

In this paper, motion planning and control scheme for a cooperative transportation system is proposed, which consists of a single object to transport and multiple autonomous non-holonomic mobile robots. Also, this paper presents the design of cooperative control that allows establishing and maintaining a specific geometric formation to a mobile robot group while they are moving. Leader-follower approach control strategy was used but a ROS-based virtual leader was implemented, because the main idea is keep the formation all time by minimizing the error as low as possible. As a result of the research, it was proved by a ROS-based simulation the cooperative control system that permits a set of robots to keep a specific formation while the group performs a predetermined mission.

I. INTRODUCCIÓN

La robótica cooperativa fue creada para dar soluciones a varios problemas que la humanidad ha querido resolver a lo largo de la historia, y no pueden ser desarrollados por un solo robot. Ésta es extremadamente usada para desarrollar de una manera simple varias actividades de la vida cotidiana de los seres humanos [1]. La robótica cooperativa se divide en dos tipos, el primero es el trabajo realizado por robots estáticos que desarrollan procesos de manufactura para crear diferentes tipos de objetos o productos [2]. Mientras que el segundo tipo es definido como trabajos grupales desarrollados por robots móviles y en este caso, una de las aplicaciones más interesantes es mantener una formación específica mientras el grupo se está moviendo dentro de un espacio [3]. En aplicaciones como exploración de espacios desconocidos, creación de mapas, operaciones de seguridad o transporte de objetos, es esencial que los robots siempre se encuentren en una formación específica sin importar el movimiento que el grupo realice [4].

Hoy en día los objetos grandes, largos y pesados son transportados por grupos de personas, buscando que los esfuerzos individuales sean extremadamente reducidos. Cuando cada persona sostiene el objeto en una específica posición y todos se mueven de manera sincronizada, el trabajo se divide de forma pareja entre todos los integrantes del grupo. Con la robótica cooperativa se busca transportar objetos de la misma manera, y ese es el inicio de una interesante problemática que trae grandes beneficios, aumentando el potencial e incrementando la utilidad de cada robot [5].

Actualmente el objetivo del control de formación es, mover cada robot dentro de un grupo para que sigan una trayectoria predeterminada manteniendo un patrón o formación predeterminada [6, 7]. Esta es una solución para controlar satisfactoriamente la formación de múltiples robots, resolviendo las incertidumbres de modelado, las perturbaciones externas, el control de precisión, la capacidad de control de las singularidades de patrones formaciones, etc. [8].

Varias temáticas en control de formación como la estabilidad de la formación, la controlabilidad de los diferentes patrones de formación y evasión de obstáculos han sido investigadas activamente en la última década. En esos estudios las *estructuras virtuales*, *comportamiento grupal* y *líder-seguidor* son las leyes de control cooperativo más estudiadas [4]. La ley de control más utilizada es *líder-seguidor* debido a que en ella se divide la actividad entre dos diferentes roles, un robot es denominado como el líder del grupo y los demás son denominados como los seguidores. La función principal del líder es guiar al grupo por una trayectoria de referencia. De igual manera, cada seguidor debe mantener su posición en relación con el líder mientras se mueven [9]. En la ley de control *líder-seguidor* el líder es el único que conoce la trayectoria de referencia y los seguidores solamente predicen y siguen la trayectoria del líder [10]. Este sistema de control puede ser desarrollado de dos maneras, centralizado y descentralizado. Cabe resaltar que el control cooperativo aplicado en este artículo es descentralizado porque esto le permite ser más robusto y escalable con relación a un controlador centralizado [11].

El presente documento expone la estrategia de coordinación *líder virtual*, la cual convierte el complejo problema de formación multiagente en un simple problema de robot rastreador y seguidor. En este trabajo, un robot virtual fue desarrollado en ROS y es designado como el líder del grupo. Este robot virtual es simulado como una partícula moviéndose dentro del espacio pero intentando desarrollar el movimiento que puede ser físicamente desarrollado por los robots reales. De igual manera, el objeto que se va a transportar es representado por el líder virtual y su centro de gravedad es ligado al sistema de coordenadas del robot virtual.

Una trayectoria es generada para el líder virtual y el origen del sistema de referencia del robot debe seguirla. El líder virtual solo debe seguir la trayectoria que se desea que el objeto desarrolle y los robots reales tienen que rastrear al líder, manteniendo así una determinada posición en relación con él, de manera que si todos los robots desarrollan esta acti-

vidad de manera correcta el error del grupo va a ser mínimo. Comparado con la mayoría de esquemas de control, el método propuesto exhibe la atractiva característica de reducir el error grupal, significando que el grupo va a estar la mayoría de tiempo en formación, asegurando que el objeto va a ser transportado satisfactoriamente. Esta característica es la más importante en aplicaciones de transporte de objetos rígidos, la cual puede ser implementada en fábricas y bodegas.

A continuación se enuncia la estructura constituida de este trabajo: El capítulo II describe el sistema de control propuesto para transportar el objeto. En el capítulo III muestra el modelado propuesto para el líder virtual. El capítulo IV describe los controladores desarrollados para la aplicación, los cuales se muestra su funcionalidad en el capítulo V. Finalmente en el capítulo VI, se manifiestan las conclusiones, los aportes, las aplicaciones y propuestas innovadoras que surgieron a lo largo de la investigación y que se podrán realizar en trabajos futuros.

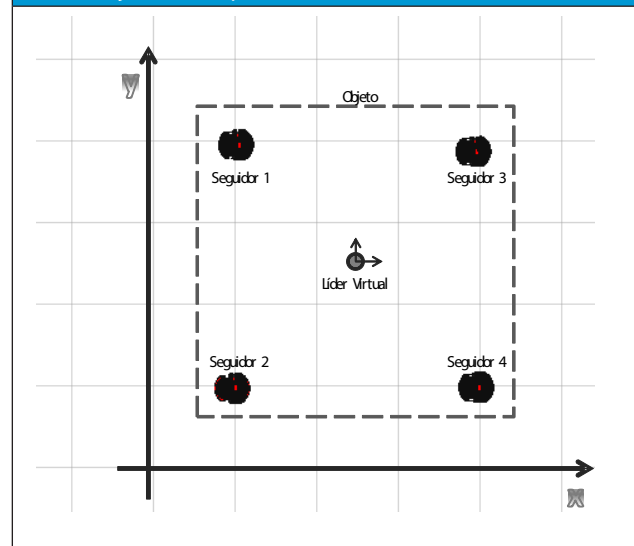
II. SISTEMA DE CONTROL DE FORMACIÓN DE ROBOTS PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE

La idea principal de control es organizar el grupo de robots móviles para transportar un objeto específico desde una posición inicial hasta una deseada. Para desarrollar esta tarea, el grupo debe mantener una formación específica mientras todos los robots se están moviendo alrededor del espacio. El objeto debe estar soportado por un número de puntos de apoyo que le permiten estar en balance cuando está siendo transportado. Cada robot debe localizarse en un punto de apoyo y debe asegurarse de estar siempre en ese punto durante el movimiento. Según el objeto que se desea transportar se determina el número mínimo de puntos de apoyo necesarios, de igual manera dependiendo de los puntos de apoyo se determina la formación del grupo que los robots deben mantener.

El sistema de transporte cooperativo organiza el grupo de robots móviles basándose en la estrategia *líder virtual*. Esta estrategia de control consiste en crear un robot virtual, el cual va a ser el líder

del grupo y se ubicara en el centroide del objeto a transportar, mientras que los robots reales van a ser denominados los *seguidores*. Estos van a ser los encargados de llevar el objeto como se muestra en la Figura 1 (Ver Fig. 1). El objetivo es lograr que el centro de gravedad del objeto siga la trayectoria de referencia considerando las limitaciones físicas de los robots.

Fig. 1. Ubicación del líder virtual y los seguidores en relación con el objeto a transportar.



El propósito de ubicar al líder virtual en el centro del objeto que se desea transportar, es que los robots siempre se van a localizar con relación al objeto. Inicialmente, como el líder virtual sigue la referencia de movimiento, la posición específica que cada robot debe mantener es determinada en relación con la posición del objeto y los puntos de apoyo.

La red de comunicación entre los robots fue desarrollada mediante el uso de ROS (Robot Operating System), específicamente utilizando el paquete ROSARIA, dicho paquete permite controlar los robots Pioneer 3-DX (Ver Fig. 2) de la compañía MobileRobots con los cuales se van a desarrollar las pruebas.

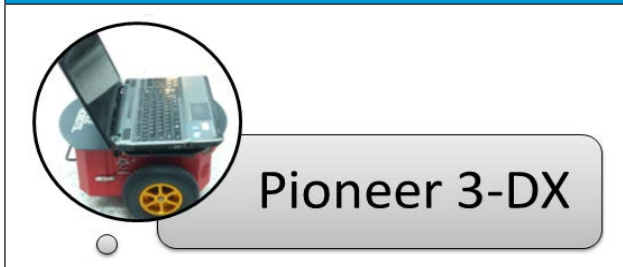
III. PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTO

Esta aplicación va a ser implementada en robots diferenciales, por ende es importante decir que este tipo de robots son sistemas no holonómicos, esto quiere decir que tienen restricciones diferenciales

que no pueden ser completamente integrados [12]. Primero que todo, el modelo cinemático del robot es necesario para generar la trayectoria suave para el líder virtual que todos los robots puedan seguir.

Dependiendo del peso y tamaño del objeto a transportar se determinará el número de robots tipo Pioneer 3-DX necesarios. Este robot es tipo diferencial, es decir, cuenta con dos ruedas principales atadas directamente a sus motores, y una rueda castor ubicada en la parte posterior del chasis.

Fig. 2. Robot Pioneer #DX de la compañía MobileRobots.

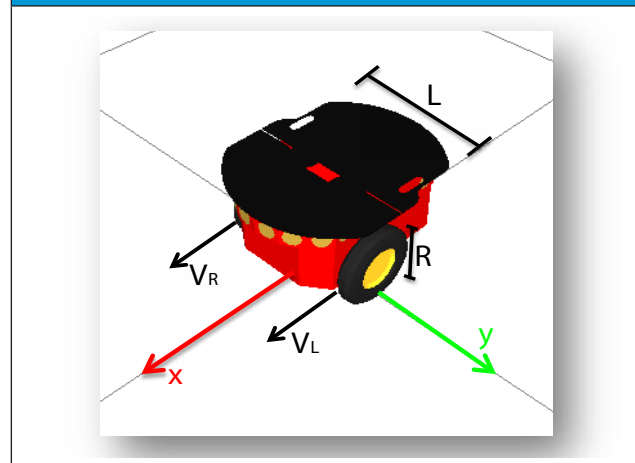


Estos robots diferenciales son considerados como mecanismos sólidos, rígidos y sin partes flexibles. De igual manera, hay que tener en cuenta las restricciones no holonómicas del robot puesto que este no se puede mover hacia los lados sin ayuda de una fuerza externa. El sistema de control necesario para esta aplicación, debe asegurar que el robot se mueva con una velocidad lineal específica y que rote con una velocidad angular determinada. Por ende el modelo matemático necesario debe estar relacionado con estas variables.

Como se necesita la posición global exacta y la orientación del robot, es necesario tener una relación matemática entre las entradas del robot (la velocidad de cada rueda "vr" y "vl") y las variables de salida que determinan la posición y orientación del robot (X, Y, φ). En la Figura 3, se define L como la distancia del eje y R como el radio de las ruedas del robot. De igual manera, Vx y Vy definen la velocidad traslacional del robot en cada eje, las cuales combinadas determinan la velocidad total del robot Vt. VR y VL representan la velocidad específica de cada rueda y finalmente la velocidad angular del robot se denomina como w (Ver Fig. 3).

El modelo cinemático del robot define su movimiento y para determinarlo es importante analizar el comportamiento del robot, por ejemplo, la velocidad lineal del robot (v) es la relación entre la velocidad angular promedio y el radio de las ruedas (R) (1); y la velocidad angular del robot (w) es determinada por la relación entre el tamaño del eje (L) y la diferencia de velocidades angulares de las ruedas (2). Las ecuaciones que definen la dinámica de movimiento de un robot para cada eje son usadas en (3), (4) y (5), también es necesario usar una matriz de rotación, ya que el robot no está alineado con el eje global todo el tiempo. Finalmente, el modelo cinemático directo para un robot diferencial es definido en (6). Con esto se puede concluir que la orientación y ubicación del robot cambia de acuerdo con la diferencia de velocidades que exista entre cada rueda.

Fig. 3. Variables del movimiento de un robot diferencial.



$$v = R \frac{v_r + v_l}{2} \quad (1)$$

$$w = R \frac{v_r - v_l}{L} \quad (2)$$

$$\dot{x} = v * \cos\theta \quad (3)$$

$$\dot{y} = v * \sin\theta \quad (4)$$

$$\dot{\phi} = w \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \frac{\cos\theta}{2} & R \frac{\cos\theta}{2} \\ R \frac{\sin\theta}{2} & R \frac{\sin\theta}{2} \\ R/R & R/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

IV. CONTROLADORES DE LÍDER VIRTUAL Y SEGUIDORES

Para que la aplicación sirva sin importar el número de robots presentes, el controlador fue desarrollado en varios niveles, de manera que existen varios subcontroladores, por ejemplo existe un control de grupo que se encarga de determinar los puntos de apoyo necesarios para transportar el objeto y le informa a cada robot donde debe estar ubicado. Por otro lado, cada robot tiene su propio controlador que se encarga de determinar cómo debe ser su movimiento para que siempre este ubicado en el lugar correcto. El sistema de control para los seguidores fue desarrollado usando ROS (Robot Operating System), específicamente bajo la implementación del paquete ROSARIA. Este paquete permite controlar los aspectos de los robots como la velocidad lineal y angular, la aceleración, etc.

Para desarrollar el control, es necesario dividir el controlador en dos funciones diferentes: El movimiento del líder virtual y el movimiento de los seguidores. El líder debe seguir la trayectoria de referencia y guiar a los seguidores; por el otro lado, los seguidores deben mantener una posición específica en relación con él. Los seguidores conocen la posición del líder y el desplazamiento relativo del grupo, pero desconocen la trayectoria de referencia [4].

Para simular el movimiento del líder virtual, este robot fue considerado como una partícula moviéndose en el espacio y para ello se inicia del modelado matemático desarrollado en [9]. En ese trabajo los autores concluyen que el movimiento de la partícula es linealmente independiente para cada eje, por ende definen el movimiento como la suma de dos subsistemas. Cada subsistema define el movimiento de un eje (X o Y) y son representados por los siguientes espacios de estado (7) (8) y las siguientes funciones de transferencia (9) (10) [13].

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (7)$$

$$y(t) = [1 \ 0] x(t) \quad (8)$$

$$\frac{x(t)}{R_{fx}(t)} = \frac{1}{3^2} \quad (9)$$

$$\frac{y(t)}{R_{fy}(t)} = \frac{1}{3^2} \quad (10)$$

En esta aplicación, un controlador PID fue desarrollado de manera que el líder virtual presente movimientos suaves y prolongados, para que los robots reales puedan seguir la trayectoria generada (Ver Fig.4). Luego de implementar el controlador para el líder virtual, el movimiento deseado fue obtenido con un tiempo de establecimiento que permite realizar el movimiento similar al de los robots, el cual se presenta en la Figura 5 (Ver Fig.5).

Fig. 5. Controlador de movimiento para el líder virtual.

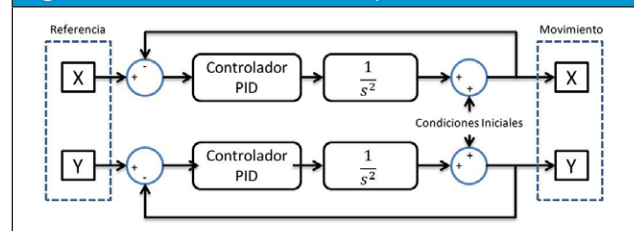
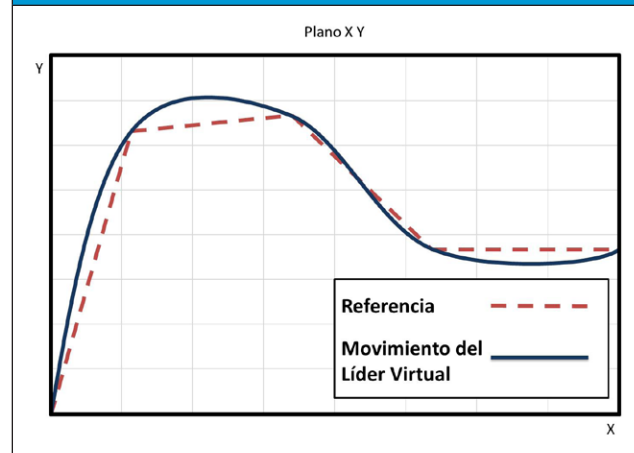


Fig. 5. Movimiento del líder virtual.



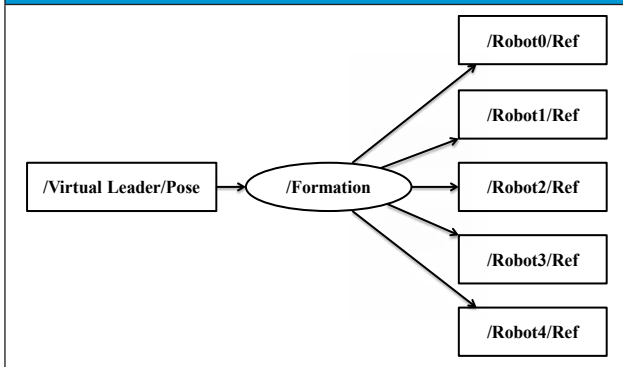
La formación que el grupo debe mantener es determinada por el número de puntos de apoyo necesarios para transportar el objeto, ya que cada uno de esos puntos de apoyo será una posición específica que un robot deberá mantener. Para controlar el grupo es importante conocer cada uno de los puntos de apoyo, por esa razón cada una de esas posiciones está registrada en la matriz de formación (M_F) (11). El controlador de grupo calcula y envía la posición global específica que cada robot debe mantener relacionando la posición del líder virtual

(VL) y la formación de los puntos de apoyo (12). Este controlador solamente recibe la posición del líder virtual y publica a cada uno de los robots la posición a mantener [14] (Ver Fig.6).

$$M_{Formation} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_f = M_{Reference} - M_{Formation} \quad (12)$$

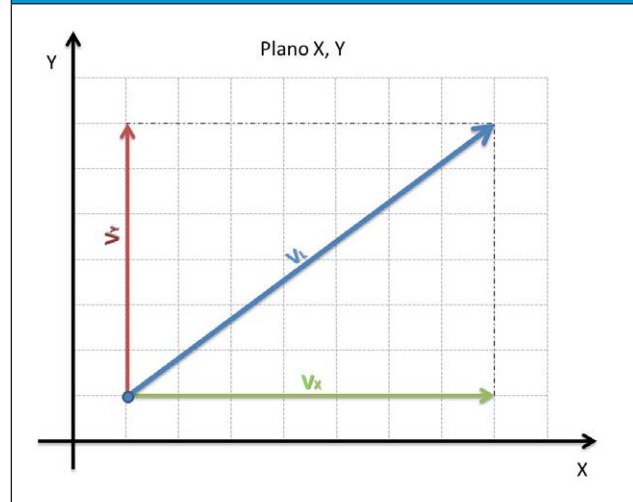
Fig. 6. Control de formación, Nodo en ROS.



Con respecto a los seguidores, cada robot debe mantener su posición, de manera que logre ubicarse en la referencia que el control grupal está enviando en todo momento. Este controlador recibe del nodo grupal la referencia (X, Y, θ) y del nodo RosAria recibe la información correspondiente a la orientación y posición actual del robot, con esta información se calculan los errores de ubicación de cada robot. Como el objetivo es que el robot realice un movimiento donde el robot se oriente a medida que se va desplazando, el controlador se dividió en 3 subsistemas, un control para orientación y un controlador para cada componente de la velocidad lineal (X, Y) .

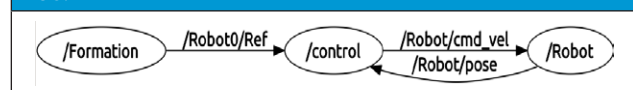
Para controlar la posición del robot, la velocidad lineal del robot se dividió en cada componente, de manera que quedará un control de posición simple para cada eje, eso quiere decir que existe un control PID independiente para el eje X y otro diferente para el eje Y. Cada uno de los controladores recibe el error respectivo y calcula la respectiva señal de control necesaria (Componente de velocidad). Finalmente, la magnitud de la velocidad lineal del robot, es calculada a partir de la magnitud de los componentes usando trigonometría (Ver Fig.7).

Fig. 7. Velocidad lineal y sus componentes



El último controlador se encarga de variar la velocidad angular del robot, este recibe como entrada el ángulo más corto que el robot debe girarse para estar bien orientado, es decir el error de orientación. El controlador calcula el ángulo más corto mediante el uso de la librería "angles.h", específicamente utilizando la función "shortest_angular_distance". Esta función solicita dos ángulos (referencia y orientación actual) y regresa el ángulo más corto sin importar el cuadrante en que se encuentren. Luego de tener el error de orientación, se realiza un control tipo PID buscando cambiar la velocidad angular para reducir ese ángulo hasta cero. Finalmente, la velocidad angular y lineal son enviadas al robot mediante el nodo de "RosAria" con el mensaje "Robot/cmd_vel", este nodo se encarga de controlar la mecánica del robot asegurando que siempre se desplace a la velocidad deseada (Ver Fig. 8).

Fig. 8. Diagrama del sistema de control implementado en ROS.



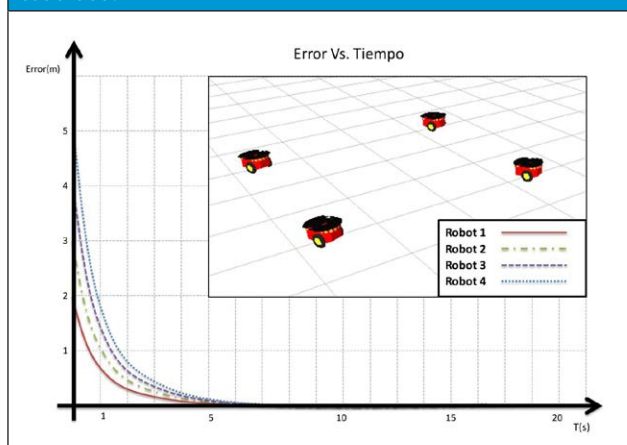
V. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Esta sección presenta el análisis de resultados del sistema de control propuesto. El sistema de transporte cooperativo para múltiples robots no holonómicos propuesto fue codificado en ROS usando lenguaje C++, y fue probado en la simulación "Mo-

bileSim” de la compañía MobileRobots y el entorno virtual de ROS “Rviz”. En la aplicación el líder virtual tiene una velocidad traslacional máxima de 0.2 m/s y una velocidad rotacional máxima de 5 grados/s.

Con el sistema de control funcionando, varias pruebas fueron desarrolladas con una trayectoria de referencia variante en el tiempo para evaluar si los robots podían seguir al líder virtual correctamente. En primer lugar, se ensayó simular transportar un objeto rectangular, por ende el líder virtual debe seguir la trayectoria de referencia y los robots seguidores mantienen una formación cuadrada rodeando siempre la posición del líder virtual (Ver Fig.9).

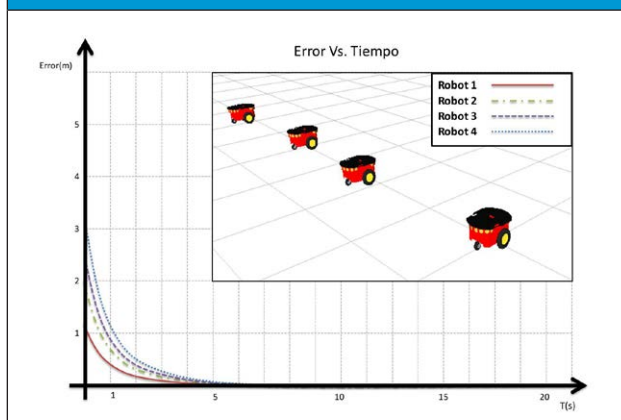
Fig. 9. Gráfica de Tiempo Vs Error grupal para una formación cuadrada.



En la siguiente prueba la trayectoria de referencia y la formación fueron cambiadas. Primero, el grupo de robots siguió una trayectoria de referencia sinodal y mantuvieron una formación lineal (Ver Fig.10). Finalmente, el controlador permitió al grupo de robots seguir la referencia manteniendo la formación deseada para transportar el objeto. De igual manera, el líder virtual siguió satisfactoriamente la referencia y los robots seguidores fueron capaces de mantener el error grupal en 0 mientras transportaban el objeto.

La formación cuadrada puede ser usada para levantar objetos como cajas, maletas, personas, sillas de ruedas, balones, etc. De igual manera la formación lineal puede ser utilizada para empujar objetos en bodegas, almacenes, fábricas, etc.

Fig. 10. Gráfica de Tiempo Vs Error grupal para una formación lineal.



VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este documento se propone un sistema cooperativo de transporte de objetos, mediante el uso de formación de robots. Como novedad se implementó un líder virtual, el cual permite mejorar la precisión del movimiento reduciendo el error grupal al mínimo, de igual manera los errores generados por las restricciones físicas de los robots son eliminados.

Una trayectoria de referencia es generada solamente para el líder virtual y cada robot genera su propia trayectoria para encontrarse en todo momento en formación con el grupo. El sistema de control fue diseñado por capas, ya que existen diferentes niveles de control; por ejemplo existe un control encargado de regular la formación que se debe mantener, pero cada uno de los robots tiene su propio controlador PID que le permite asegurarse de estar en la posición correcta.

Los sistemas multiagentes mejoran las capacidades físicas de los robots, por ejemplo, un robot tipo Pioneer 3-DX puede tener una carga paga de 20 Kg en promedio, este sería el límite de peso permitido para cargar un objeto con este robot. En cambio, si se aplica el método propuesto, al implementarse 4 robots lógicamente la carga paga del grupo aumentará considerablemente a 80 Kg en promedio. Considerando esto, el sistema de control propuesto fue diseñado para n-número de robots permitiendo utilizarlo para transportar cualquier objeto sin importar el peso, la formación o el número de robots necesarios.

Los resultados presentados en simulaciones muestran que el método implementado es efectivo para transportar objetos por un grupo de robots, ya sea levantándolo o empujándolo dentro del espacio. El siguiente paso a seguir es implementarlo en un grupo real de robots. Además, los siguientes estudios e investigaciones a realizar deben ir enfocados en la búsqueda e implementación de aplicaciones, que lleven el método propuesto a ser aplicado en la industria y la vida cotidiana, en aplicaciones donde sea necesario transportar objetos pesados y/o largos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está apoyado por el proyecto ING-1766 denominado "Estudio de técnicas de control cooperativo descentralizado en formación de robots móviles no holonómicos- Fase III", financiado por el vicerrectoría de investigación de la Universidad Militar Nueva Granada en Bogotá, Colombia.

REFERENCIAS

- [1] M. Uchiyama, "Multirobots and cooperative systems," in *Control Problems in Robotics and Automation*, Springer-Verlag London Limited, United Kingdom, vol. 230, pp. 19-34, 1998.
- [2] N.M. Kwok, V.T. Ngo, Q.P. Ha, "PSO-Based Cooperative Control of Multiple Mobile Robots in Parameter-Tuned Formations," in *IEEE Int. Conf. Automation Science and Engineering*, Scottsdale, AZ, pp.332-337, 2007.
- [3] F. Diaz del Rio, G. Jimenez, J.L. Sevillano, A. Civit_Balcells, "A generalization of path following for mobile robots" in *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Detroit, MI, pp. 7-12, 1999.
- [4] F. Bravo, D. Patiño, K. Melo, C. Parra, "Switching control and modeling of mobile robots formation," in *IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conf. Automatic Control and Industry Applications Robotics Symp.*, Bogota, pp. 1-6, 2011.
- [5] T. Balch, F. Dellaert, A. Feldman, A. Guillory, C. Isbell, et al. "How multirobot systems research will accelerate our understanding of social animal behavior," in *Proc. IEEE*, Vol. 94, No. 7, pp.1445-1463, July 2006.
- [6] X. Yang, K. Watanabe, K. Izumi and K. Kiguchi, "A decentralized control system for cooperative transportation by multiple non-holonomic mobile robots," *International Journal of Control*, Vol. 77, No. 10, pp. 949-963, 2004.
- [7] J. Jongusuk and T. Mita, "Tracking Control of Multiple Mobile Robots," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'01)*, Seoul, Korea, Vol. 3, pp.2885- 2890, 2001.
- [8] Z. Yao, Y.D. Song, ; W. Cai, "Neuro-adaptive virtual leader based formation control of multi-unmanned ground vehicles," in *11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, pp. 615 – 620, 2010.
- [9] M.V. Manuel, S.G. Leonardo, R.G. Adriana, V.T. Nelson, "Decentralized cooperative control technique for non-holonomic mobile formation," in *III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*, Cartagena, pp.1-5, 2014.
- [10] M. Fujii, W. Inamura, H. Murakami, K. Tanaka, K. Kosuge, "Cooperative Control of Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object with Loose Handling," in *IEEE International Conference on Robotics and Biometrics*, Vols. 1-5, pp. 816-822, 2007.
- [11] M. Udomkun and P. Tangamchit, "Cooperative Behavior-based Control of Decentralized Mobile Robots on an Overhead Box Carrying Task," in *Proceedings of ECTI-CON'08*, pp. 633 – 636, 2008.
- [12] S.M. LaValle, *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, 2006.
- [13] J. J. P. Veerman, G. Lafferriere, J. S. Caughman, A. Williams, "Flocks and Formations," in *J. Statistical Physics*, vol. 121, no. 5-6, pp. 901-936, Dec, 2005
- [14] J. J. P. Veerman, G. Lafferriere, J. S. Caughman, A. Williams, "Decentralized control of vehicle formations," in *Lett. Systems & Control*, vol. 54, no. 9, pp. 899-910, Sept., 2005.