

COORDINACIÓN DE DOS ROBOTS MÓVILES TERRESTRES EN FORMACIÓN LÍDER-SEGUIDOR CON EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Juan Luis Mata-Machuca

Instituto Politécnico Nacional, Unidad
Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas, Departamento de
tecnologías avanzadas
Ciudad de México, México

Mauricio Sánchez Ortega

Instituto Politécnico Nacional, Unidad
Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas, Ingeniería
mecatrónica
Ciudad de México, México

David Alejandro Toro-Sandoval

Instituto Politécnico Nacional, Unidad
Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería
y Tecnologías Avanzadas, Ingeniería
mecatrónica
Ciudad de México, México

All content in this magazine is
licensed under a Creative Com-
mons Attribution License. Attri-
bution-Non-Commercial-Non-
Derivatives 4.0 International (CC
BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Un aspecto importante en la robótica colaborativa es lograr controlar sistemas de múltiples robots de manera simultánea, haciendo que realicen tareas de forma sincronizada. Para lograr lo anterior, y además que los robots se muevan manteniendo una formación, es necesario abordar el problema a través de técnicas de control cooperativo. Este trabajo describe una metodología para el diseño, implementación y validación de la coordinación de dos robots móviles con ruedas con una formación “líder-seguidor”, donde el robot líder tiene la tarea de seguir una trayectoria predeterminada por un usuario siendo capaz de evadir obstáculos fijos y de enviar al robot seguidor los puntos de ruta alcanzados. Una interfaz gráfica de usuario para monitoreo y control permitirá la selección del punto o trayectoria que el líder deberá seguir hasta alcanzar la posición final, evadiendo los obstáculos en su camino y sin tener una colisión con los bordes del área de trabajo, una vez que el robot líder llegue a este punto y el usuario habilite el movimiento en coordinación del robot seguidor, éste deberá tomar en cuenta su posición y calcular su distancia relativa al líder, y con base en esta información realizar el movimiento en dirección a la posición del robot líder, respetando una distancia de formación entre ellos de manera que el movimiento sea coordinado y no existan colisiones o separaciones dentro de la formación. Al mismo tiempo, con la información proporcionada por el sensor LiDAR se evitarán colisiones con un posible obstáculo presente en el área de trabajo y se conservará el movimiento para llegar al robot líder.

Palabras clave: Formación líder-seguidor, evasión de obstáculos, robots móviles con ruedas.

INTRODUCCIÓN

La formación de robots consiste en establecer el movimiento de un grupo de robots para que lleven a cabo una tarea específica de una manera coordinada o colaborativa [1]-[4]. Recientemente este problema ha atraído significativamente la atención de la comunidad científica por las aplicaciones complejas que se pueden resolver usando más de un robot [5]-[8]. Por ejemplo, en [9] se revisaron las técnicas de control para robots móviles cooperativos que monitorean múltiples objetivos, en [10] se presenta una aplicación práctica de múltiples robots para realizar misiones de búsqueda y rescate, en [11] se propone un sistema de impresión 3D que emplea múltiples robots móviles que imprimen simultáneamente una pieza de mayor longitud que una máquina convencional, en [12] se diseñó e implementó un sistema multi-robot para el transporte de objetos.

Un problema para considerar en la robótica cooperativa es mantener configuración geométrica durante el movimiento. En [13] realizaron el control de formación de múltiples robots móviles, en donde se presenta un modelo cinemático para el sistema líder-seguidor el cual utiliza coordenadas cartesianas en lugar de coordenadas polares, tomando la idea del integrador backstepping, en donde se propone un control global estable para todo el sistema. En [14] se describe una propuesta de control visual para la formación de robots móviles tipo unicycle bajo el esquema líder-seguidor. Se considera una sola cámara fija observando el espacio de trabajo de los robots que, en términos de la información procesada, puede ser compartida tanto por el robot líder como por el robot seguidor. Lo anterior permitiría que la realización de esta propuesta pueda llevarse a cabo por estrategias de control centralizadas o descentralizadas. Para efectos de simplificar el análisis, también se considera

que el plano de imagen es paralelo al plano de movimiento de los robots. El objetivo de formación se establece directamente en coordenadas de imagen y el controlador visual propuesto no depende explícitamente de los parámetros (extrínsecos o intrínsecos) del sistema de visión. Por último, también como parte importante en [14], para validar la teoría propuesta se detallan experimentos satisfactorios utilizando un sistema de visión de tiempo real y alta velocidad.

En este trabajo se describe la propuesta para el diseño, implementación y validación para el control de dos robots móviles terrestres con configuración diferencial bajo un esquema líder-seguidor, donde, el robot líder tendrá la tarea de seguir una trayectoria predeterminada por un usuario, con la autonomía para esquivar objetos fijos y compartir información de la posición de dichos objetos con el robot seguidor. El robot seguidor tendrá la capacidad de imitar los movimientos del robot líder con base en la información proporcionada por parte del robot líder, todo esto desarrollado en superficies y ambientes controlados.

Para resolver el problema planteado se aplicará un enfoque de diseño concurrente basado en la descomposición por áreas funcionales. El diseño concurrente comienza con la identificación de un problema, y asigna las funciones necesarias para resolverlo. A estas funciones se le asocian características con las cuales se inicia la etapa de diseño conceptual en la que se analizan diferentes alternativas, y se evalúan para elegir la opción adecuada. Posteriormente, se formaliza ese concepto en la parte diseño detallado cuyo objetivo es tener una aproximación bastante cercana del producto final y cómo se debería construir. Siempre se deben llevar a cabo validaciones de todas las funciones propuestas.

El resto del documento se divide como a continuación se indica. En el planteamiento del problema se presenta de manera breve toda

la teoría utilizada para el diseño del control de la coordinación de los robots móviles. Así mismo, se explica la metodología de diseño utilizada y las herramientas en las que ésta se apoya. En la sección de Diseño Conceptual se muestran las áreas funcionales que conforman cada robot y se obtiene el concepto final del sistema mecatrónico, que sirve de base para el diseño detallado. En la sección de Diseño Detallado se habla de las especificaciones técnicas de cada área funcional y se lleva a cabo la integración de todas las áreas funcionales. En la sección de Validación y Análisis de Resultados se describen los resultados de las simulaciones computacionales, y se incluye un análisis de los datos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema propuesto para la coordinación de dos robots móviles se describe en la Figura 1. Se puede ver que el usuario selecciona la trayectoria de referencia, la computadora recibe la trayectoria, y envía las acciones de control al robot líder. El robot líder envía su posición y orientación a la computadora. En por otro lado, el robot seguidor recibe estas coordenadas desde el ordenador y sigue los puntos recorridos por el líder, de la misma manera envía su posición y orientación a el ordenador. La computadora será la encargada de hacer decisiones sobre la modificación de la trayectoria en presencia de obstáculos.

El análisis cinemático es esencial para obtener un modelo matemático apropiado de los robots móviles y para el diseño de los controladores dada cierta configuración de un robot. Los robots considerados en este trabajo tienen 2 ruedas en el eje de tracción y una rueda loca, como se muestra en la Figura 2. Para comenzar a entender el movimiento de los robots primero es necesario representar la posición en un marco de referencia [15]. La posición de P en el marco de referencia

global se especifica mediante las coordenadas (x, y) y la diferencia angular entre los marcos de referencia global y local viene dada por θ . Se puede describir la postura (posición y orientación) del robot como un vector con estos tres elementos según la ecuación $\mathcal{E}_I[x \ y \ \theta]^T$. El subíndice I se usa para denotar la base de esta postura con respecto al marco de referencia global.

Para describir el movimiento del robot en términos de componentes del movimiento, se recurre a la matriz de rotación ortogonal,

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz $R(\theta)$ puede ser usada para rastrear el movimiento del robot en ambos marcos de referencia, es decir, permite cambiar del marco de referencia local al global y viceversa, con el uso de las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{E}}_R &= R(\theta)\dot{\mathcal{E}}_I \\ \dot{\mathcal{E}}_I &= R(\theta)^{-1}\dot{\mathcal{E}}_R, \end{aligned}$$

donde $\dot{\mathcal{E}}_I = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$.

Por otro lado, para la localización se emplea la librería AMCL de ROS (Sistema Operativo Robótico, por sus siglas en inglés), la cual hace uso de un sistema de localización probabilístico para un robot moviéndose en 2D [16]. Esta librería implementa el enfoque de localización adaptable de Monte Carlo [17]. De manera general, para un mapa ya establecido, este algoritmo estima la posición y orientación de un robot a medida que éste empieza a moverse.

La evasión de obstáculos se basa en el histograma de campo vectorial (VFH). Es un método presentado inicialmente en [18] y posteriormente mejorado en [19]. Consiste en la detección y evasión de obstáculos permitiendo al mismo tiempo dirigirse a su objetivo. El método toma como entrada los datos capturados por sensores de tipo láser o ultrasónicos, y con éstos forma tres niveles

de representación de datos. El primero es un mapa 2D dividido por celdas, el segundo es un histograma polar construido alrededor de la posición momentánea del robot, y el tercero es la dirección que debe seguir el robot.

En la coordinación de robots líder-seguidor, el líder sigue una trayectoria predefinida, mientras que los seguidores mantienen una posición y dirección con cierta distancia respecto al líder [20]. Una definición más general es que un robot actúa como el líder cuyo movimiento determina el trayecto para el grupo de seguidores. Todos los seguidores usarán el trayecto definido para alcanzar una meta o lograr una tarea definida [21].

DISEÑO CONCEPTUAL

Para tener una comprensión mayor del sistema se procede a descomponerlo en áreas funcionales, lo cual permite visualizar una tarea complicada en funciones más simples. La Figura 3 muestra las áreas funcionales que componen al sistema de robots móviles en configuración líder-seguidor.

El área funcional de Estructura se encarga de soportar todos los circuitos, sensores y procesadores. Cumple las funciones de proteger y soportar al sistema completo, además de que permite integrar físicamente todas las demás áreas funcionales.

En el área funcional de Procesamiento se realizan las acciones de control necesarias para evadir los obstáculos y seguir al líder. Además, desarrolla la comunicación entre ambos robots, y la interfaz de usuario.

En el área funcional de Percepción se capturan datos del entorno (datos exteroceptivos) y del robot (datos propioceptivos) para ser procesados y permiten extraer información necesaria para localizar al robot en el área de trabajo y detectar obstáculos.

El área funcional de Alimentación suministra energía eléctrica en sus niveles correspondientes a todos los componentes de

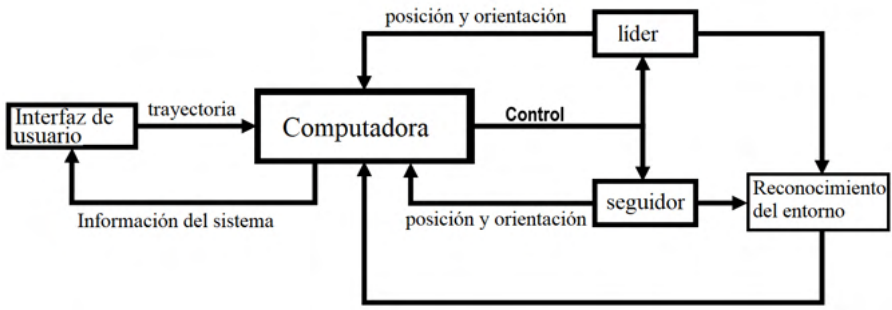


Figura 1. Formación líder-seguidor

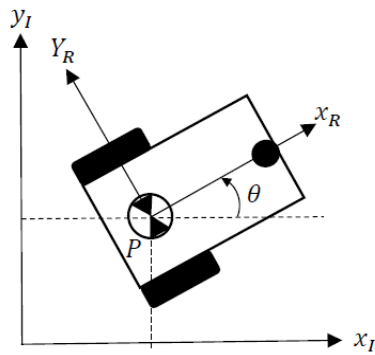


Figura 2. Marco de referencia global y marco de referencia local

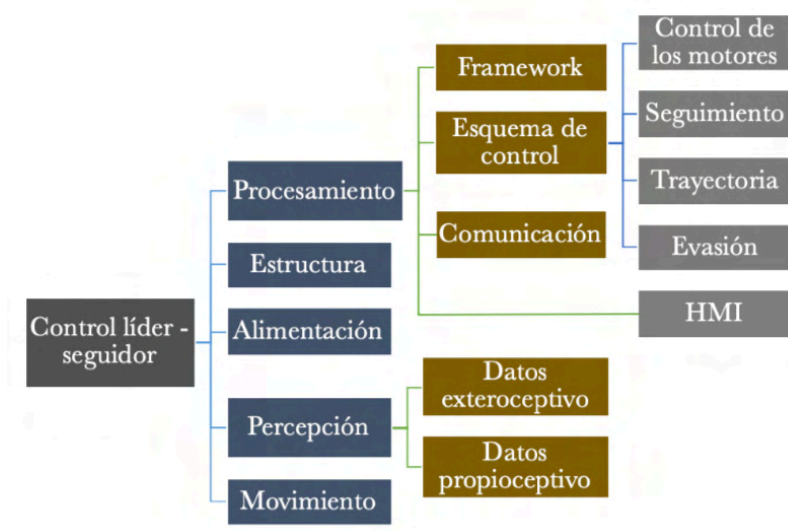


Figura 3. Áreas funcionales del sistema de robots móviles en configuración líder-seguidor.

las demás áreas funcionales.

Finalmente, el área funcional de Movimiento corresponde a la configuración de los robots, es decir, la configuración diferencial todos los motores y controladores respectivos. Con respecto al robot móvil se eligió el Turtlebot3 Burger.

La figura 4 muestra el diseño conceptual del sistema de robots móviles en configuración líder-seguidor. Se puede apreciar al robot líder trazando una trayectoria que evade obstáculos, y que el robot seguidor deberá seguir. Existe comunicación inalámbrica entre ambos robots y una interfaz humano-máquina.

Los números en la Figura 4 representan lo siguiente,

1. Comunicación WiFi entre la interfaz y los robots
2. Robot seguidor con sensores LiDAR y acelerómetro.
3. Robot líder controlado directamente desde la interfaz.
4. Obstáculos
5. Computadora con la interfaz y sistema operativo ROS para comunicarse con los robots.
6. Marcas de distintas formas para una mejor identificación con el sensor LiDAR.
7. Ambiente de iluminación controlado favorable para la operación del sensor LiDAR.
8. Suelo plano y con coeficiente de fricción mayor a 0.4.
9. Trayectoria predefinida.
10. Punto de objetivo propuesto por el usuario.
11. Distancia mínima de separación entre los obstáculos y los robots móviles de al menos 10 cm.
12. Distancia entre la computadora y el área de prueba de hasta de 2 metros.
13. Dimensiones del área de trabajo no

mayores a 6 metros x 6 metros.

DISEÑO DETALLADO

En esta sección se analiza con más profundidad cada una de las áreas funcionales antes mencionadas junto con las características y datos técnicos de cada uno de los elementos que las conforman. La figura 5 muestra la integración de las distintas áreas funcionales que conforman a cada uno de los robots y su implementación con sus distintos componentes que en conjunto conforman un sistema que tiene como fin la coordinación, navegación y ejecución de tareas proporcionadas por un usuario.

La estructura integra físicamente todas las demás áreas funcionales, para el sistema se utilizó la estructura propia del robot Turtlebot3. Para el procesamiento se utilizaron las tarjetas de desarrollo Raspberry Pi Model B y OpenCR con un microcontrolador STM32F746ZGT6. Para la recopilación de los datos (percepción) se utilizaron encoders rotatorios, para la estimación de la posición del robot, y acelerómetros para la detección del movimiento; y un sensor láser para detectar la distancia a objetos puntuales (obstáculos) mediante un barrido. Una batería Li-Po recargable de 1800 mAh a 11.10 V es la encargada de abastecer de energía eléctrica al sistema completo. El sistema tiene una configuración diferencial para su locomoción.

La Estructura está directamente relacionada con el tamaño y el peso de las distintas piezas que conforman los robots, así como el tipo de locomoción, en donde, los robots móviles Turtlebot3 Burger (Figura 6) cuentan con una estructura modular y compacta que hace posible la distribución de los distintos componentes del robot a través de sus diferentes plataformas y cuya estructura es capaz de soportar hasta 15 kg de peso, partiendo de que la estructura en conjunto con la batería LiPo y el sensor LiDAR es de

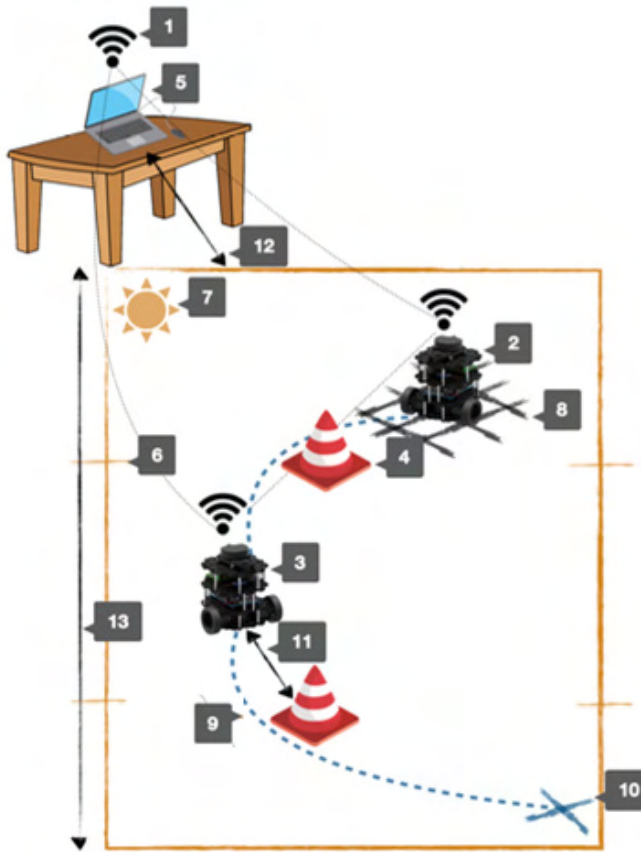


Figura 4. Concepto final del sistema de robots móviles en configuración líder-seguir.

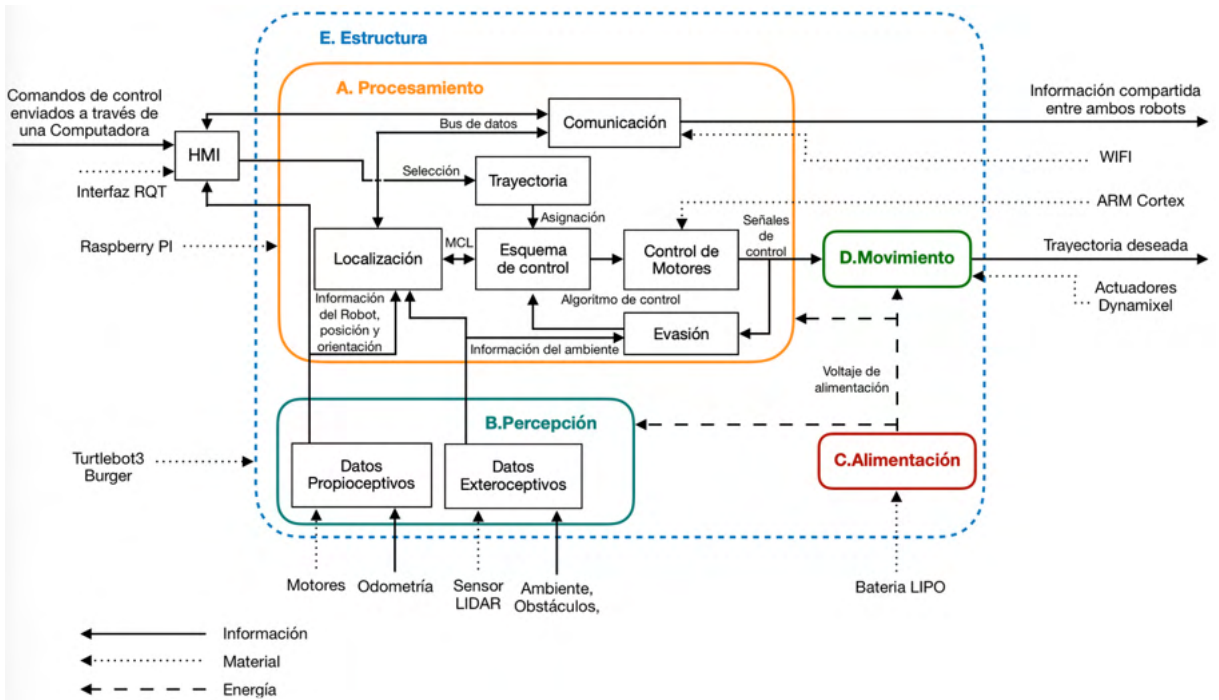


Figura 5. Integración de las áreas funcionales.

apenas 1 kg.

El Turtlebot3 Burger al ser un robot denominado multiplataforma o multicapa ofrece entre otras bondades un mejor uso del espacio y mejor maniobrabilidad a la hora de ensamblar los componentes que conforman al robot. Cuenta con 4 plataformas las cuales distribuyen los distintos componentes en cada una de ellas y sus chapas o pisos en forma de celdas permite la implementación de diferentes componentes y funciones de acuerdo con cada tarea ejecutada por el robot.

El procesamiento es un área funcional de suma importancia de acuerdo con el diagrama de la integración de las distintas áreas funcionales (Figura 5), puesto que además de ser el área con mayor número de subáreas, es una de las partes principales donde recae todo el desarrollo del esquema de control Líder - Seguidor. Esta área funcional se dividió en tres secciones con el objetivo de volver más transparente el proceso de diseño. La primera parte consiste en la descripción de las tarjetas encargadas del procesamiento, razón por la cual se mencionan las distintas tarjetas y sus características más relevantes, es decir se define el recurso disponible para realizar procesamiento. En la segunda parte se definen las funciones que deberán cumplir cada una de las tarjetas, y finalmente se describe como se está proponiendo cumplir dichas funciones.

En la primera parte se tiene que son cinco los dispositivos donde existirá procesamiento,

- Líder: Raspberry Pi 3 Model B .
- Líder: OpenCR.
- Seguidor: Raspberry Pi 3 Model B .
- Seguidor: OpenCR.
- Computadora de monitoreo.

En la segunda parte se definen las funciones a desarrollar en cada tarjeta de la siguiente manera: en la tarjeta Raspberry Pi del robot líder se lleva a cabo el seguimiento de trayectoria y la evasión de obstáculos,

mientras que en la tarjeta Open CR del líder se realiza el control de los motores; en la tarjeta Raspberry Pi del seguidor se implementa el algoritmo de seguimiento hacia el robot líder y en la tarjeta Open CR del seguidor se tiene el control de los motores.

En la tercera parte, respecto al procesamiento, las áreas funcionales se desarrollan en diferentes nodos de ROS, es decir un programa no cumplirá una función, sino que dicha función estará dividida en distintos nodos, en cada una de las áreas funcionales se mencionaron los nombres de los nodos en los cuales se desarrollaron las áreas funcionales, la manera en que los diversos nodos se comunican es por medio de tópicos, los cuales también fueron listados en la sección de transmisión de mensajes. Una manera simple de mostrar la integración de estos nodos es a través de los diagramas de las Figuras 7 y 8, los cuales presentan los nodos activos para cada Turtlebot3.

La tercera área funcional a analizar es la Percepción, la cual tiene la función de adquirir los datos propioceptivos y exteroceptivos de cada uno de los robots, es decir, la recabación de datos como la distancia, velocidad y posición de los móviles para poderlos ubicar en el espacio (odometría - información propioceptiva), o el recabación de la información del ambiente, para poder ubicar los obstáculos dentro del área de trabajo (información exteroceptiva). Para la recabación de la información propioceptiva se necesita un control preciso de los actuadores del móvil para lograr orientar a los móviles de manera correcta, y así, en conjunto con una buena lectura de los datos que se puedan obtener de la rotación de las ruedas poder llevar a cabo una estimación de la posición de los móviles durante la navegación. Los datos recabados por los sensores posteriormente serán leídos por el hardware (área funcional de procesamiento), el cual se encargará de

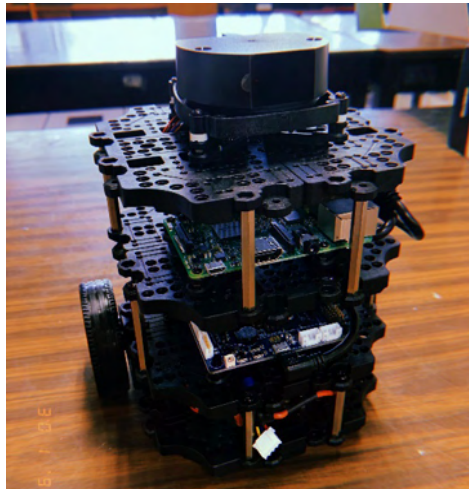


Figura 6. Turtlebot3 Burger.

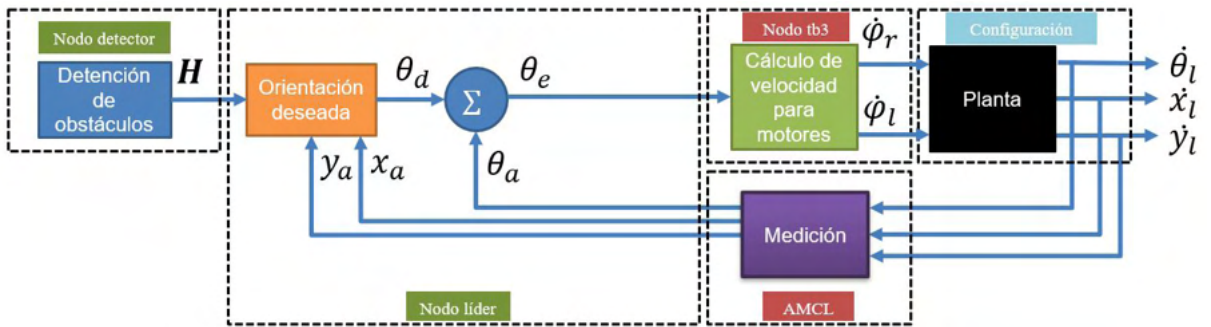


Figura 7. Esquema de control para el robot líder.

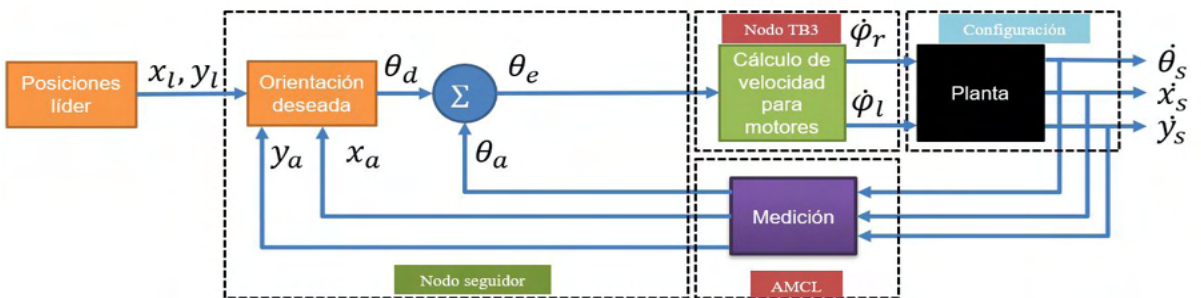


Figura 8. Esquema de control para el robot seguidor.

su procesamiento para realizar una tarea en específico. Para poder llevar a cabo la solución de esta área funcional se planea separar de manera general en las dos clasificaciones de información y así desglosar cada uno de sus elementos que conllevan.

La cuarta Área Funcional es la de Alimentación, la cual es la encargada de abastecer de energía a tres áreas funcionales fundamentales para el móvil. Cada una de estas áreas tiene sus propios elementos para poder llevar a cabo sus tareas; en el caso de la segunda área funcional denominada Procesamiento, es necesario abastecer a dos tarjetas, las cuales son la Raspberry Pi y la ARM Cortex M7, cada una con sus respectivas entradas y salidas. En la tercera área funcional denominada Percepción, es necesario alimentar de acuerdo a las especificaciones técnicas un sensor LiDAR el cual proporcionará toda la información del entorno y brindará los datos exteroceptivos del ambiente que posteriormente estos datos serán evaluados y procesados en la segunda área funcional. En cuanto al movimiento, los encargados de llevar a cabo esta tarea son dos actuadores Dynamixel (uno en cada llanta) que son los responsables de la locomoción del móvil y de la ejecución de toda la información antes proporcionada por las distintas áreas funcionales. Teniendo en cuenta que estos actuadores al igual que el sensor LIDAR, brindarán información acerca del movimiento (rotación) de las llantas que posteriormente esta información servirá para conocer la posición y orientación de los móviles (odometría).

El movimiento o locomoción forma una parte fundamental del esquema de coordinación ya que es la última función antes de que el robot ejecute la información proporcionada, una vez esta haya pasado por las 4 funciones previas que engloban el sistema. El sistema de locomoción está en la primera capa dentro de la estructura de nuestros

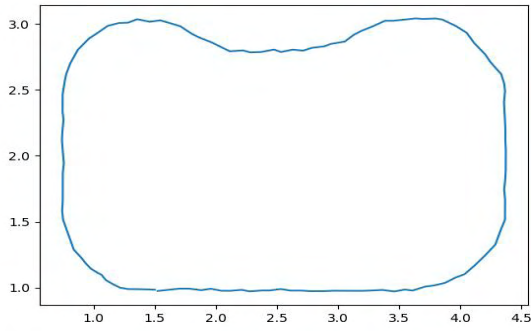
robots, y tiene como eje fundamental dos actuadores Dynamixel XL 430 - W250 en cada llanta, lo que se traduce a una configuración cinemática de tracción diferencial.

A continuación se presentan los resultados numéricos de la implementación del esquema de control para la coordinación de dos robots móviles diferenciales en configuración líder seguidor.

El objetivo que se persigue a partir de las simulaciones numéricas es determinar si los algoritmos implementados en un Turtlebot3 virtual cumplen su función o no. La figura 9 muestra los resultados de la validación del seguimiento de trayectorias del líder y del seguidor. La figura 9(a) es la trayectoria propuesta por el usuario. Las figuras 9(b) y 9(c) describen la coordinación líder-seguidor sin obstáculos. En la figura 9(d) se muestran los obstáculos que estarán presentes al momento de realizar el recorrido. Finalmente, la figura 9(e) incluye los resultados de la coordinación líder-seguidor con evasión de obstáculos; comparando las coordenadas por las que el robot líder y seguidor pasan se valida el diseño de los algoritmos.

Ahora se presentan los resultados experimentales en las Figuras 10 y 11. El objetivo de esta prueba fue validar el funcionamiento del sistema en conjunto, líder-seguir y evasión. Se realizó una prueba en el ambiente físico, colocando ambos robots a 50 cm de distancia y dos obstáculos. Se muestran las gráficas del error de seguimiento.

Como se puede observar en las Figuras 10 y 11, el error disminuye cuando se mantiene dentro de la trayectoria y aumenta cuando requiere alejarse de la trayectoria e iniciar la evasión, para ambos robots el comportamiento es el mismo, lo cual valida que realmente existe una evasión ya que el líder toma como prioridad no colisionar a mantenerse sobre la trayectoria, como el seguidor realiza las acciones del líder también lleva a cabo la



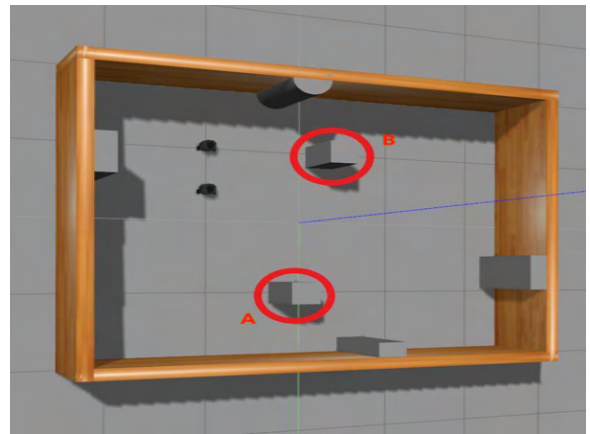
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 9. Coordinación líder-seguidor. (a) Trayectoria predefinida, (b) Trayectoria recorrida por el líder, (c) seguimiento de trayectoria por el seguidor, (d) obstáculos A y B, (e) coordinación con evasión de obstáculos.

evasión de obstáculos.

Para lograr que el sistema tenga una mejor interacción con el usuario se optó por integrar una interfaz, para esto se buscaron varias posibilidades de frameworks de trabajo que fueran compatibles con ROS. Dadas estas características se utilizó el ambiente de trabajo QtCreator en el cual había sido utilizado para desarrollar una de las principales herramientas para el análisis de la información que posee el ambiente de ROS, logrando esto por medio de la interfaz RQt realizada en Qt, en dicha interfaz se pueden visualizar las conexiones entre nodos, los valores de los distintos tópicos, mandar información para probar las variables de los tópicos de los nodos como la velocidad de los motores del Turtlebot3 burger y graficar la información de los nodos a través del tiempo entre otras funciones.

En los resultados de la ejecución de la interfaz se destacan 3 ventanas principales las cuales son,

- Ventana para elegir trayectoria y encender o apagar al robot.
- Ventana para visualizar el historial de la trayectoria elegida.
- Ventana para graficar, limpiar gráficas o guardar datos.

En la primera ventana como se muestra en las Figuras 13, 14 y 15 se elige la trayectoria deseada por el usuario y con esta elección

se podrá ver la imagen de la trayectoria a seguir, sin embargo, esta se cargará hasta que se presione el botón cargar trayectoria, para que de esta manera se puedan inspeccionar libremente las trayectorias antes de cargarlas.

En la segunda ventana se muestra el historial de todas las trayectorias cargadas, así como los mensajes de prueba para verificar que la interfaz este enviando bien la información a través de ROS, en la Figura 16 se muestra un historial de trayectorias cargadas (donde además se puede consultar cual es la trayectoria por seguir actualmente).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se abordó el desarrollo de un esquema de control líder-seguidor, implementado a dos robots móviles terrestres con configuración diferencial, los cuales tienen el objetivo de llegar a diferentes puntos o trayectorias dentro de un área de trabajo, evadiendo obstáculos dentro del escenario de pruebas o en la trayectoria. La tarea a cumplir por parte del robot líder es la de seguir alguna trayectoria proporcionada por el usuario (por medio de una interfaz gráfica) y evadir los obstáculos fijos dentro de un área de trabajo controlada, mientras que la tarea a cumplir por parte del robot seguidor, es imitar el comportamiento del líder de manera autónoma.

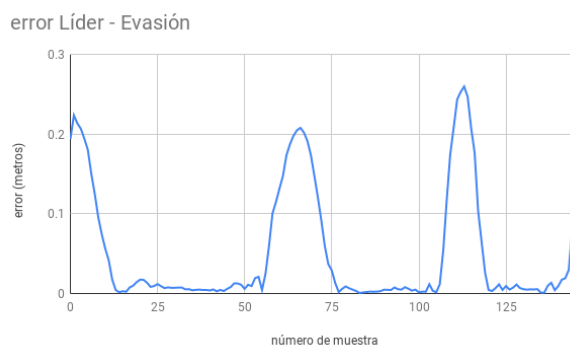


Figura 10. Error del líder

error Seguidor - Evasión



Figura 11. Error del seguidor



Figura 12. Ventana inicial de la interfaz.

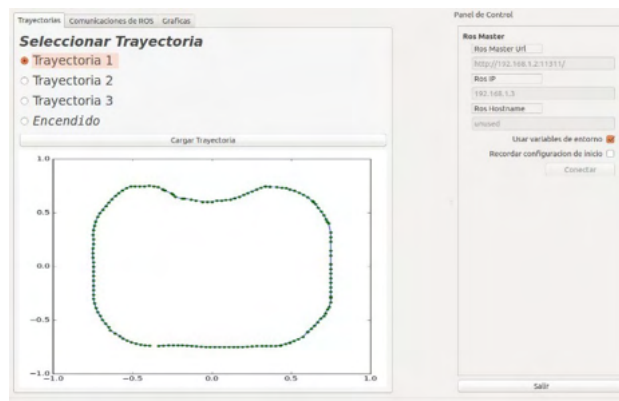


Figura 13. Trayectoria 1.

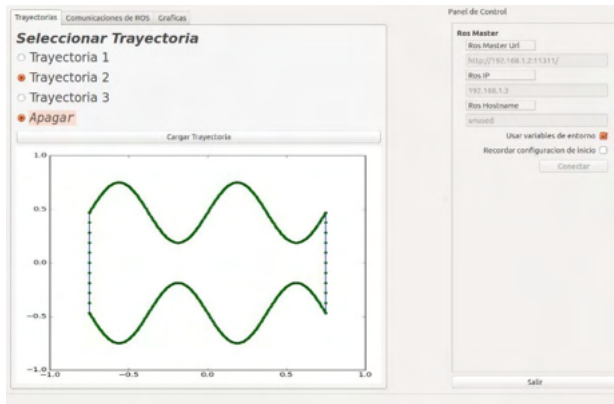


Figura 14. Trayectoria 2.

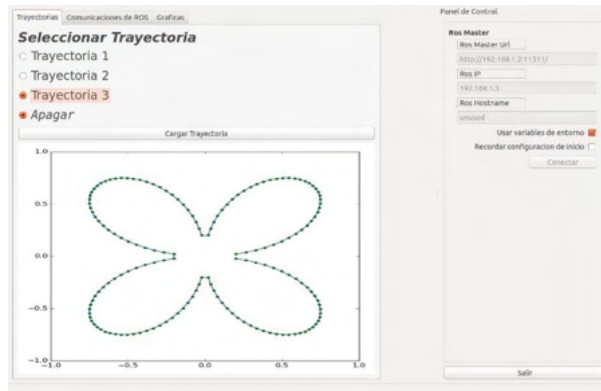


Figura 15. Trayectoria 3.

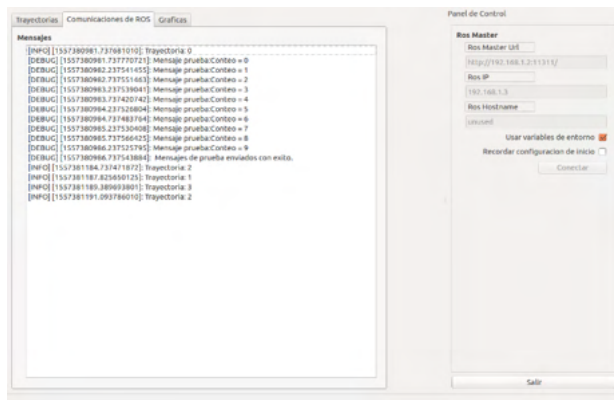


Figura 16. Interfaz con el historial de trayectorias seleccionadas.

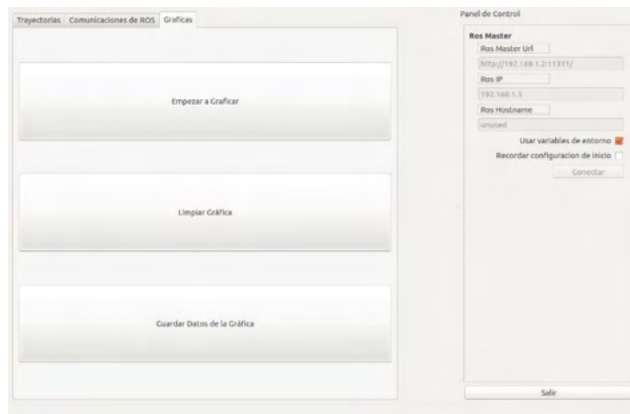


Figura 17. Interfaz mostrando las opciones para graficar.

REFERENCIAS

- [1] E. Roszkowska, P. Dulewicz, L. Janiec, "Hierarchical hybrid control for multiple mobile robot systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 8, pp. 452-457, 2019.
- [2] V. Digani, M. A. Hsieh, L. Sabattini, C. Secchi, "Coordination of multiple AGVs: a quadratic optimization method," *Autonomous Robots*, vol. 43, no. 3, pp. 539-555, 2019.
- [3] M. A. Kamel, X. Yu, Y. Zhang, "Fault-tolerant cooperative control design of multiple wheeled mobile robots," *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 26, no. 2, pp. 756-764, 2018.
- [4] L. Dong, Y. Chen, X. Qu, "Formation control strategy for nonholonomic intelligent vehicles based on virtual structure and consensus approach," *Procedia engineering*, vol. 137, pp. 415-424, 2016.
- [5] X. Liang, H. Wang, Y. H. Liu, W. Chen, T. Liu, "Formation control of nonholonomic mobile robots without position and velocity measurements," *IEEE Transactions on Robotics*, 34(2), 434-446.
- [6] C. M. Soria, R. Carelli, R. Kelly, J. M. Ibarra-Zannatha, "Coordinated control of mobile robots based on artificial vision," *International Journal of Computers Communications & Control*, vol. 1, no. 2, pp. 85-94, 2006.
- [7] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints," *Automatica*, vol. 44, pp. 1343-1349, 2008.
- [8] F. Rubio, F. Valero, C. Llopis-Albert, "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 2, 2019, Art. no. 1729881419839596.
- [9] A. Khan, B. Rinner, A. Cavallaro, "Cooperative robots to observe moving targets: Review," *IEEE Transactions on cybernetics*, vol. 48, no. 1, pp. 187-198, 2016.
- [10] C. E. Lee, T. K. Sung, "TWR based cooperative localization of multiple mobile robots for search and rescue application," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 11, no. 3, pp. 127-132, 2016.
- [11] X. Zhang, M. Li, J. H. Lim, Y. Weng, Y. Tay, H. Pham, Q. C. Pham, "Large-scale 3D printing by a team of mobile robots," *Automation in Construction*, vol. 95, pp. 98-106, 2018.
- [12] A. G. Barrientos, J. L. Lopez, E. S. Espinoza, J. Hoyos, G. Valencia, "Object transportation using a cooperative mobile multi-robot system," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14 no. 3, pp. 1184-1191, 2016.

- [13] Li, Xiaohai; Xiao, Jizong; Cai, Zijun. Backstepping based multiple mobile robots formation control. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 887-892.
- [14] C. E. Bugarin, A. Y. Aguilar, "Control visual para la formación de robots móviles tipo unicycle bajo el esquema líder-seguidor," Ingeniería investigación y tecnología, vol. 15, pp. 593-602, 2013.
- [15] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza, Introduction to autonomous mobile robots. MIT, 2011.
- [16] M. B. Quigley, B. Gerkey, W. D. Smart, Programming robots with ROS, O'Reilly Media, 2015
- [17] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, Probabilistic robotics, MIT Press, 2010.
- [18] J. Borenstein, Y. Koren. "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, 1991.
- [19] I. Ulrich, J. Borenstein. "VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots," Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146), pp. 1572-1577, 1998.
- [20] T. Petrinic, I. Petrovic. "A leader-follower approach to formation control of multiple non-holonomic mobile robots," 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), pp. 931-935, 2013.
- [21] B. Madhevan, M. Sreekumar. "Tracking algorithm using leader follower approach for multi robots". Procedia Engineering, vol. 64, pp. 1426-1435, 2013.