

Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos

VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J*†, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L.

Universidad Veracruzana, Lomas del estadio s/n, Edificio

Recibido Julio 4, 2016; Aceptado Septiembre 5, 2016

Resumen

En este trabajo se plantea una estrategia de navegación con objetivos para robots móviles, basada en condiciones geométricas de un entorno de trabajo. El problema se aborda a partir de descomposiciones y triangulaciones poligonales del espacio de trabajo; y un controlador asintótico que permite a los robots desplazarse de un punto a otro sin conocimiento inicial de las condiciones del ambiente. En la estrategia se diseña un algoritmo de generación de rutas basado en características de visibilidad hacia una meta global en función de la existencia de obstáculos fijos o móviles, mismos que permiten definir la existencia de puntos auxiliares de control como mínimos locales en el problema de convergencia hacia una meta global. El proceso involucra conmutaciones de referencias cuando, sin que se haya alcanzado un mínimo local, el robot encuentre mejores condiciones de posicionamiento con visibilidad plena hacia el objetivo.

Robot móvil, Navegación, Obstáculos móviles, Colisión

Abstract

This paper addresses the navigation problem for mobile robots under uncertain working conditions. It is assumed that the environment is unknown at the beginning of any experiment and that a visual feedback module supports the navigation strategy to make a set of robots achieve a goal in an environment with obstacles. The proposed navigation algorithm depends on the obstacle localization, and it is based on visibility conditions of the goal and control points that are defined from the geometric distribution of the environment.

Mobile Robot, Navigation algorithm, mobile obstacles

Citación: VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L. Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 18-26

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alejanvasquez@uv.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Problemas como exploración y transporte de materiales requieren de soluciones que pueden ser atendidas por algoritmos de navegación autónoma de un conjunto de robots móviles trabajando de forma sincronizada. En general, los algoritmos para navegación de robots móviles han tenido un crecimiento en la actualidad. En [7] se presenta una revisión del estado del arte en el tema de navegación para robots móviles. Con respecto a la generación de esquemas que doten de autonomía a un robot para poder desplazarse ágilmente en un entorno desconocido, algunos enfoques importantes usan herramientas probabilísticas de localización [2], [4]; mientras que en [3] se implementa una estrategia de navegación haciendo uso de localización basada en sistemas inalámbricos sensoriales. Con respecto a las condiciones de colisión entre robots en entornos con obstáculos, en [14] se desarrolla una revisión de esquemas de navegación con obstáculos. Los métodos de reconocimiento y modelado del entorno han sido abordados en [8], donde se aborda una estrategia basada en redes neuronales, o en [12], donde la conectividad de diversos puntos sensoriales define el espacio de trabajo, o en [13], donde se desarrolla un mapeo basado en sensores y cuadrículas de ocupación.

Por su parte, la consideración de obstáculos móviles cuando más de un robot se desenvuelve en un entorno, define un obstáculo en movimiento con el que hay que lidiar. En [15] se aborda la definición de puntos de control para efectos de guía en ambientes con objetivos dinámicos. Para problema de navegación con objetivos, enfoques como [10] abundan en el problema clásico de un par de agentes en el que uno de ellos busca atrapar al otro en un espacio poligonal cerrado. En ese trabajo se definen algoritmos de avance y localización garantizando una convergencia al objetivo en tiempo finito.

La definición de espacios de trabajo mediante segmentos poligonales también es tratada en [11], donde mediante un sistema de visión, un robot puede navegar de un punto a otro. En [5] se abordan propiedades de descomposición de polinomios convexos para la implementación de el algoritmo de navegación A*.

En este trabajo se propone una estrategia de navegación mediante polígonos definidos por los obstáculos en un entorno de trabajo; dichos polígonos son la base de la definición de los puntos de referencia que permiten a un conjunto de robots construir su trayectoria hacia la meta. Se considera para efectos demostrativos el uso de dos robots, cuya perspectiva individual den entorno considera obstáculos fijos, así como unobstaculo móvil dado por el otro robot siguiendo su propia trayectoria.

El trabajo está estructurado como sigue: en la Sección 2 se describe a detalle el problema abordado y la estrategia general a seguir, incluyendo la definición del entorno de trabajo y el algoritmo de navegación. En la Sección 3 se aborda el sistema de control y una discusión general sobre la convergencia en tiempo finito del algoritmo para cada robot. La plataforma experimental y descripción de los experimentos es tratada en la Sección 4 y, finalmente, se presentan algunas conclusiones y trabajo futuro en la Sección 5.

Definición del problema

El escenario de trabajo considera dos robots del tipo diferencial cuya tarea consiste en desplazarse desde un punto inicial hasta una meta global individual M_m cuya posición es conocida, en un entorno con obstáculos originalmente desconocido.

La posición de cada robot y los obstáculos es determinada por un sistema de localización absoluto fijo en la parte superior del espacio de trabajo. Aunque el problema bien podría definirse para un conjunto de n robots, en cuyo caso se dispondría de un ambiente dinámico genera con obstáculos en movimiento, en este trabajo se plantea la definición de una estrategia para solo dos de ellos sin pérdida de generalidad.

En la Figura 1 se muestra el ambiente de operación de los robots R_m cuya meta esta dispuesta de tal forma que deban evadirse k obstáculos para alcanzarla.

El método de navegación y arribo a la meta, considera el uso de puntos de control Pc que se definen mediante triangulación poligonal. Los puntos de control definidos desempeñan el papel de mínimos locales que mediante un controlador asintótico bien definido son buscados a fin de que el robot R_m pueda posicionarse mejor para alcanzar el mínimo global definido por la meta Mm .

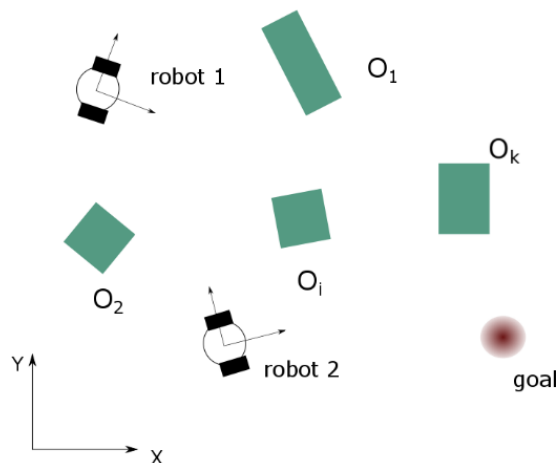


Figura 1 Escenario de trabajo.

A. Triangulación y Puntos de control

El robot R_m parte de una posición $Pr_m = [x_r(0), y_r(0), \Theta_r(0)]^T$, con conocimiento pleno de la posición de la meta, $PMm = [xMm, yMm]^T$, constante. Por otro lado, el acceso en tiempo real a un sistema de localización absoluta, permite identificar la posición de cada posible obstáculo $Poj = [xoj, yoj]^T$, con $j = 1, 2, \dots, k$. Antes de comenzar la navegación por parte del robot R_m , se lleva a cabo una reconstrucción preliminar del área de trabajo, la cual ubica y considera la distribución de obstáculos y resto de robots en el mismo espacio para identificar una posible ruta. En función de esta información, se define un polígono, utilizando como vértices, los puntos Poj que definen la posición de cada obstáculo. Naturalmente, la definición del polígono puede tener múltiples formas, por lo que se define en este caso a partir de un obstáculo aleatorio como vértice inicial $P1$ y se analiza una ruta que conecte de manera continua todos los obstáculos sin intersección hasta regresar al vértice inicial. De este modo, el resultado es un polígono de k lados, el cual se divide para la obtención de $(k - 2)$ triángulos [6] como se observa en la Figura 2.

Los puntos de control Pci , con $i = 1, \dots, (2k - 3)$, eventualmente tendrán el papel de mínimos locales, y se definen como los puntos medios de los $(2k - 3)$ trazos resultantes de la definición del polígono y su triangulación, tal como se muestra en la misma Figura 2. Nótese que la triangulación reduce una forma compleja en una colección de formas geométricas simples mediante diagonales internas sin intersección, definidas mediante a interconexión de dos vértices no consecutivos dentro del polígono [16].

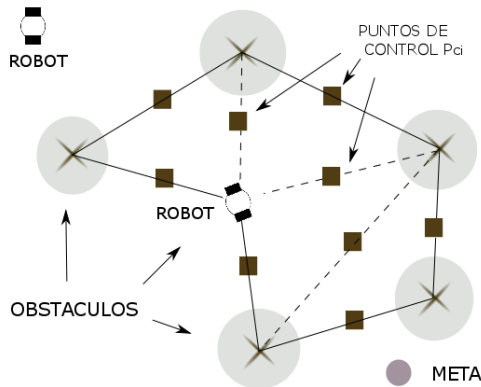


Figura 2 Triangulación y puntos de control.

Estos puntos sirven de referencia cuando la meta M_m no es alcanzable; en este caso, el robot R_m deberá decidir sobre cuál punto de control P_{ci} es adecuado para reubicarse en busca de una mejor visibilidad de la meta. Esto sin embargo, no implica que deba pasar por todos los puntos definidos, lo que definiría una solución poco práctica en tiempo de convergencia. Consecuentemente, es necesario identificar el progreso del robot hacia la meta a través de una métrica de desarrollo δr , la cual que indique la evolución del proceso de tal modo que se garantice la llegada del robot a la meta en un tiempo finito.

B. Algoritmo de navegación

Dado el conocimiento de la posición de la meta, se define una función lineal ξ_{segm} cuyo dominio $\gamma_{\xi m}$ es tal que $|P_{rxm}| \leq \gamma_{\xi m} \leq |P_{Mxm}|$, esto es, se define a partir del rango de coordenadas de la posición del robot R_m a la meta M_m a lo largo del eje X. Esta función en todo momento es evaluada con respecto a su continuidad, la cual está asociada con la posible intersección con obstáculos como se muestra en la Figura 3, donde claramente R_2 pierde visibilidad hacia su respectiva meta debido a la presencia de un obstáculo.

De esta manera, la visibilidad de la meta desde el robot puede definirse como sigue:

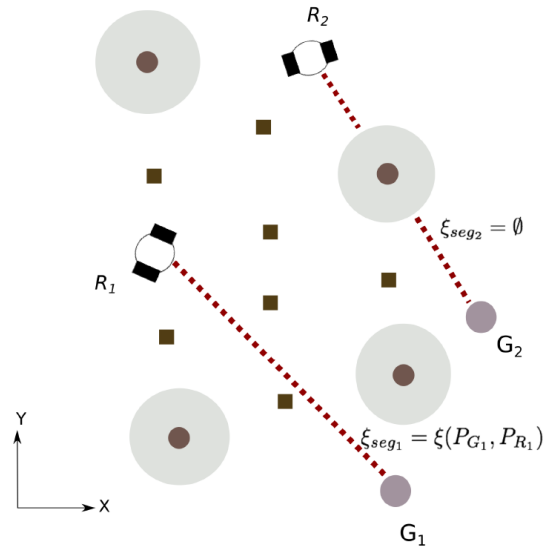


Figura 3 Evaluación de visibilidad hacia la meta.

$$\xi_{seg} = \begin{cases} \emptyset & \text{si } \exists \gamma \in \gamma_{\xi m} : \xi(\gamma) = \eta_j(\gamma) \\ \xi(P_{Mm}, P_{Rm}) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Donde $\eta_j(\cdot)$ define una área de influencia de un obstáculo i , que por simplicidad se define de forma circular, como lo muestran las zonas sombreadas en la Figura 2.

La ecuación (1) define una posible pérdida de visibilidad cuando el segmento lineal que une la meta M_m con el robot R_m , coincide con un obstáculo en un dominio común $\gamma \in \gamma_{\xi m}$ en cuyo caso ξ_{seg} no está definida. En esta instancia, en busca de una nueva ruta libre de obstáculos, se plantean objetivos parciales de control que eventualmente permitirán al robot posicionarse mejor y definir nuevamente la función $\xi(P_{Mm}, P_{Rm})$, ahora con visibilidad a la meta.

El algoritmo parte de un escenario con los $(2k - 3)$ puntos de control dentro del polígono definido por los obstáculos. Cuando el robot tiene definida una referencia de control dado por alguno de ellos, entonces tal punto de control P_{ci} representa un mínimo local y será buscado por un controlador asintótico definido en coordenadas polares como [1],

$$\begin{aligned} v &= k_p \rho \\ \omega &= k_\alpha + k_\phi \phi \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $\rho = \|PM_m - PR_m\|$, k_p , k_α y k_ϕ son ganancias de control, con parámetros auxiliares α y ϕ definidos en la Figura 4, donde se describe gráficamente la cinemática de los robots con respecto a la definición de la estrategia de control de la ecuación (2).

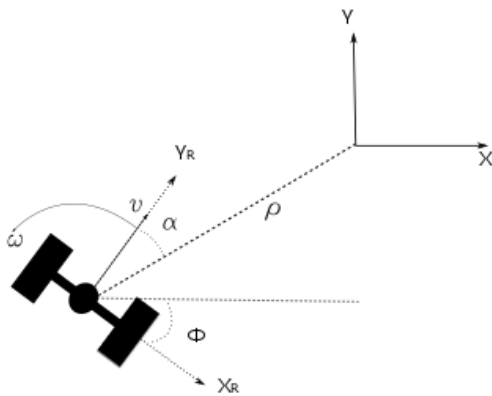


Figura 4 Cinemática del robot .

La estrategia de arribo a la meta global M_m , consiste en evaluar la interferencia de los segmentos lineales ξ (PM_m , PR_m) con posibles obstáculos. En función de esto y de acuerdo a la ecuación (1), al existir visibilidad plena el robot buscará la meta, o bien, al ser interrumpido el segmento lineal, el esquema de navegación determinará algún punto de control desde donde se garantice una visibilidad hacia M_m .

Sin embargo, bajo esta descripción general no existe garantía de lograr el objetivo global, puesto que múltiples puntos de control pueden satisfacer las condiciones de visibilidad o al contrario, pueden ser visibles para el robot, pero representan una situación sin más posibilidades de dirección; en este caso el robot puede quedar detenido en un mínimo local sin posibilidad alguna de continuar. Situaciones como ésta se muestran en la Figura 5, donde se muestra un caso de bloqueo y un caso con un comportamiento deseado a partir de una misma posición de un robot mediante conectividad de puntos de control.

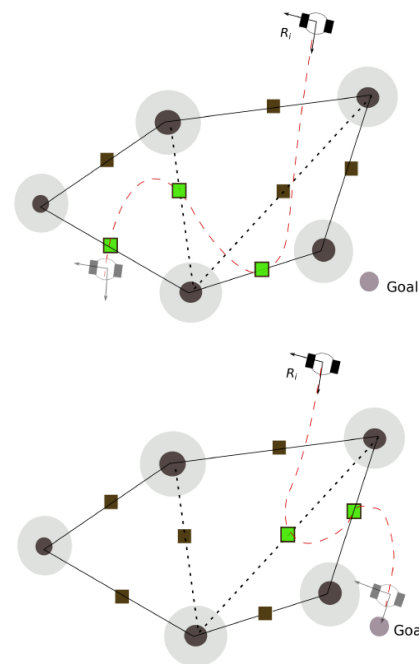


Figura 5 Casos de desempeño de ruta de robot .

Sistema de control y convergencia en tiempo finito

La solución trivial al problema de convergencia, se presenta cuando el robot dispone de una ruta visible $\xi(PM_m, PR_m)$ a la meta, en cuyo caso, el controlador (2), siendo globalmente asintóticamente estable, garantiza la convergencia a la misma.

Sin embargo, en presencia de un obstáculo j que impida la visibilidad directa, esto es que $\xi_{seg} = \emptyset$, el robot determinará como objetivos parciales de control alguno de los puntos de control predefinidos, de tal modo que la métrica de progreso δr tenga un comportamiento monótono que garantice el arribo a la meta en un tiempo finito. Considérese el monitoreo del progreso de navegación a partir de,

$$\delta r = \|PMm - PRm\| \tag{3}$$

con un comportamiento deseado de la forma,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta r = 0, \tag{4}$$

Que en términos prácticos sugiere que el robot debe acercarse en todo momento a la meta, lo que a su vez delimita a los puntos de control a aquellos que además de la visibilidad, muestren una tendencia a acercarse a la meta. Para tal efecto, la toma de la decisión sobre qué punto de control P_{ci} es elegido como referencia, se hace mediante la evaluación de dos condiciones: deberá ser el punto de control más cercano a Mm que sea visible por P , y deberá existir una ruta que conecte uno o varios puntos de control que concluya con visibilidad plena a la meta Mm . Esto garantiza que la distancia δr se reduzca y se expresa como,

$$P_{ref} = \{ [xi, yi]^T \in \xi (P_{ci}, P_{rm}) | \min(\|P_{ci} - PMm\|) \},$$

$$\exists P_{ci+z} | \xi (P_{ci+z}, P_m) = \emptyset \tag{5}$$

Para $i = 1, 2, \dots, (2k - 3)$ y con z un índice que define algún punto de control posterior a P_{ci} . De este modo, el punto de control visible más cercano a la meta o con salida a la misma, P_{ref} , tendrá el papel de referencia y el robot buscará llegar a él.

Existe sin embargo, una situación importante para el cumplimiento de (4) en un tiempo aún menor que el destinado a lograr los correspondientes puntos de control. Aunque la ruta generada por el algoritmo puede asociar a más de un punto control, se establece que en todo momento es prioridad la visibilidad de la meta, por lo que durante el proceso de arribo a un punto de control que cumpla con las condiciones (5), éste puede ser interrumpido si la meta logra ser visible. En ese caso, el robot se direcciona en el mismo momento que encuentra la meta y ésta se vuelve la nueva referencia en el control. Se trata de un sistema de interrupciones o "switcheos" cuya convergencia puede ser analizada bajo determinadas circunstancias [9]. El esquema de conmutación se muestra en la Figura 6.

Por otro lado, para garantizar un comportamiento del error decreciente, independientemente de las interrupciones, se deben tener presente el desempeño del controlador (2), el cual garantiza estabilidad exponencial basado en la cinemática del robot móvil diferencial en coordenadas polares (ρ y α). En [1] está demostrado que el movimiento de un punto inicial a uno final del robot, es suave y robusto, garantizando la convergencia exponencial con,

$$k\rho > 0, k\phi < 0,$$

$$k\alpha + k\phi - k\rho > 0. \tag{6}$$

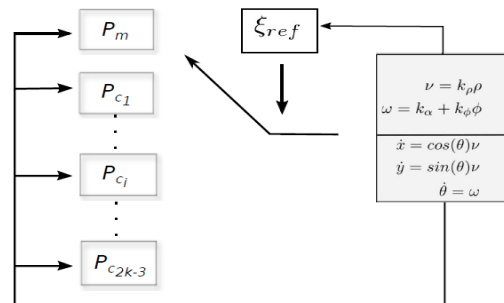


Figura 6 Sistema con conmutaciones.

Como se ha mencionado, esta estrategia de control es usada para posicionar al robot R_m a cualquier referencia aunque, éstas no necesariamente deban ser alcanzadas totalmente en vista de la repentina visibilidad de la meta global. En este escenario, aunque la estabilidad local y global con respecto a un punto de control es garantizada, la convergencia a la meta requiere la satisfacción de las condiciones (5).

Plataforma experimental y resultados

La plataforma de experimentación consiste en un par de robots diferenciales *I-Create*[®] en un espacio de trabajo cubierto por un sistema de localización absoluta que consta de una cámara digital. Se dispone de una PC como sistema de control central con comunicación inalámbrica con cada robot, que han sido adaptados con un módulo de comunicación Bluetooth; y vía alambica con la cámara que identifica en tiempo real la posición de los obstáculos y de cada robot.

En la Figura 7 se muestra la plataforma experimental descrita.

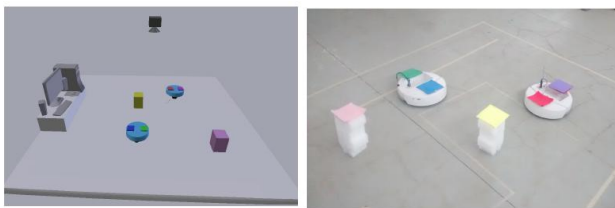


Figura 7 Plataforma experimental.

En la Figura 8, se describe el funcionamiento general del algoritmo muestra la operación de los experimentos en su funcionamiento general.

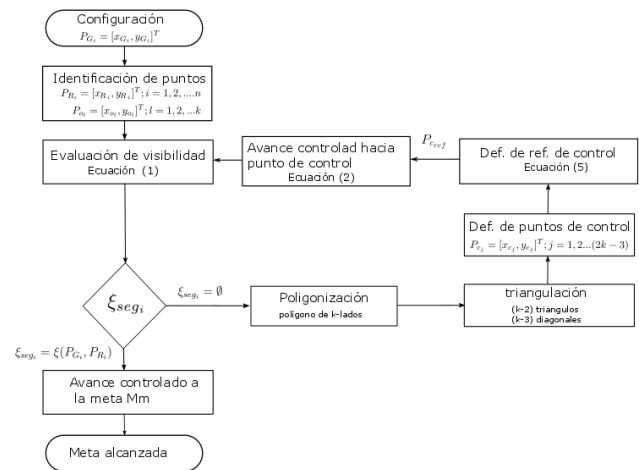


Figura 8 Algoritmo general de funcionamiento.

El robot R_m es posicionado aleatoriamente en el espacio de trabajo, y es capaz de identificar, con apoyo del sistema de localización, los elementos involucrados para definir una ruta que eventualmente termine en la meta. La duración del experimento es proporcional al número de obstáculos y el efecto de los mismos con respecto a la función de visibilidad.

Los siguientes resultados muestran un experimento con dos obstáculos fijos, por lo que cada robot percibe tres obstáculos, dos fijos y uno móvil. Cada robot parte de una posición aleatoria en el plano XY de operación de 3 m x 2 m.

En la Figura 9 se observa las rutas desarrolladas por cada robot al comenzar en una posición aleatoria del plano, con las metas definidas en el otro extremo correspondiente. Nótese la presencia de dos obtáculos y la zona de influencia de cada uno de ellos, definida por una función circular de 10cm de radio.

Es necesario remarcar que una estrategia de evasión de colisión entre los dos robots se ha implementado de manera simple de tal modo que cuando cada robot entra en la zona de influencia de otro en movimiento, se establece un criterio de prioridad, en el que el robot más cercano a su meta continúa avanzando, mientras el otro se detiene hasta recuperar la ruta libre con visibilidad al objetivo correspondiente. En la Figura, esta situación es susceptible de ocurrir ya que ambos robots intersectan su trayectoria en busca de sus metas.

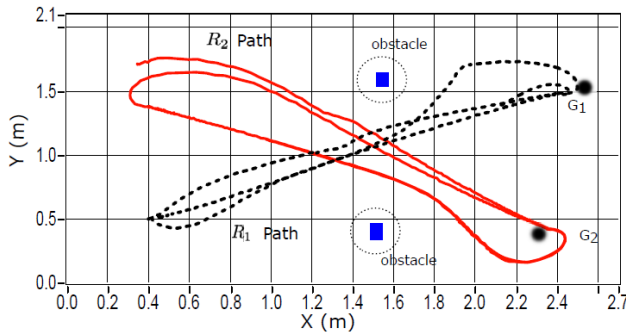


Figura 9 Rutas desarrolladas por cada robot.

El desempeño del controlador se muestra en la Figura 10, donde se puede apreciar el comportamiento de la distancia hacia la meta global, en trayectorias repetidas, correspondientes al experimento mostrado en la Figura 9.

Nótese que para ambos robots, el error inicial decrece con el tiempo en forma repetida, dependiendo la referencia que se actualiza. La gráfica muestra un desemeño global, por lo que las referencias locales dadas por los puntos de control, se perciben de forma mínima en las conmutaciones señaladas, que se producen cuando mejores condiciones de visibilidad surgen.

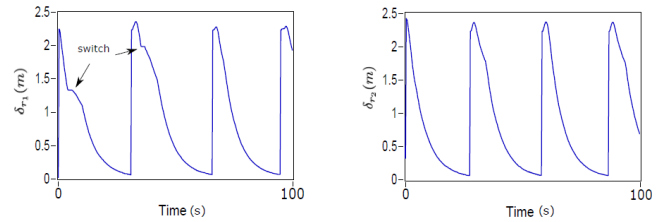


Figura 10 Rutas desarrolladas por cada robot.

Conclusiones

Los resultados obtenidos validan el planteamiento de navegación propuesto en este trabajo de un modo práctico, permitiendo a un conjunto de robots, desarrollar una estrategia de navegación en un entorno desconocido inicialmente. Como parte del algoritmo, se han definido criterios que garantizan la convergencia del objetivo de control en tiempo finito. El trabajo marca la pauta para definir un escenario más realista, que considere un entorno con una aplicación real en un entorno no controlado; esto sugiere una mejora del trabajo en el que el sistema de retroalimentación visual este a bordo del vehículo, de tal modo que el espacio de trabajo pueda extenderse. Nótese que el algoritmo de navegación es general y por lo tanto puede ser aplicado a otro tipo de robots móviles que utilicen un controlador asintótico.

Una mejora adicional que se ha identificado, es una limitante en las velocidades que el robot puede desarrollar asegurando estabilidad del sistema. Esto se debe a la velocidad de captura de la cámara usada como retroalimentación de posición, por lo que una solución inmediata consiste en adquirir un dispositivo de alta velocidad, o lidiar con alguna estrategia de compensación del retardo que una baja tasa de captura induce en la información de posición de cada robot.

Referencias

- [1] A. Astolfi. Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 121(1):121–126, 1999.
- [2] Maxim A. Batalin, Gaurav S. Sukhatme, and Myron Hattig. Mobile robot navigation using a sensor network. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 636–642, New Orleans, LA, 2004.
- [3] Joydeep Biswas and Manuela Veloso. Wifi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 4379–4384, 2010.
- [4] Wolfram Burgard. *Probabilistic Techniques for Mobile Robot Navigation*. Spatial Information Theory, 2005.
- [5] Z. Chen, S. Li, and P. Wang. Mobile robot navigation based on convex polygonal decomposition of environment. *Studies in Surveying and Mapping Science (SSMS)*, 1(4):55–64, 2013.
- [6] Mark de Berg, Otfried Cheong, Marc van Kreveld, and Mark Overmar. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer, 2008.
- [7] G. N. DeSouza and A. C. Kak. Vision for mobile robot navigation: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(2):237–267, 2002.
- [8] M.Y. Kim, H. Cho, and J.Kim. Obstacle modeling for environment recognition of mobile robots using growing neural gas network. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 1(1):134–141, 2003.
- [9] D. Liberzon. *Switching in systems and Control*. Systems and Control: Foundations and applications, Boston, 1973.
- [10] N. Noori and V. Isler. Lion and man with visibility in monotone polygons. *International Journal of Robotics Research*, 33(1):155–181, 2014.
- [11] Nageswara S. V. Rao. Robot navigation in unknown generalized polygonal terrains using vision sensors. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 25(6):947–962, 1995.
- [12] Nageswara S. V. Rao. *Terrain Model Acquisition By Mobile Robot Teams and n-Connectivity*. Distributed Autonomous Robotic Systems 4, 2000.
- [13] Maki K. Habib. *Real time mapping and dynamic navigation for mobile robots*. International Journal of Advanced Robotics Systems, 4(3):323-338, 2007.
- [14] Michael Hoy, Alexey S. Matveev, and Andrey V. Savkin. *Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex clutter environments: a survey*. Robotica, 33(3):463-497, 2014.
- [15] F. Kunwar, F. Wong, R. Ben Mrad, and B. Benhabib. *Guidance-based on-line robot motion planning for the interception of mobile targets in dynamic environments*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 47(4):341-360, 2006.
- [16] Nels Johann Lennes. *Theorems on the simple finite polygon and polyhedron*. American Journal of Mathematics, 33(1):37-62, 1911.