

# COORDINACIÓN DE EQUIPOS ROBÓTICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE ESCENARIOS

Ayala Alfaro Víctor (1), López Pérez José Jesús (2), Ayala Ramírez Víctor (3)

1 [Ingeniería en Mecatrónica, Universidad de Guanajuato] | [v.ayalaalfaro@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [jj.lopezperez@ugto.mx]

3 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [ayalav@ugto.mx]

## Resumen

En este trabajo se muestra la comparación en el desempeño de dos técnicas que utilizan asignación de objetivos para completar de una manera eficiente el problema de la exploración de escenarios desconocidos mediante un equipo homogéneo de robots. También se considera el efecto de intercambiar metas entre robots, considerando parámetros como la distancia o la orientación de los robots. Las técnicas fueron implementadas en un simulador y se hicieron pruebas con equipos de robot compuestos por un número variable de robots en distintos escenarios. Los resultados muestran que el intercambio de metas contribuye a mejorar los tiempos de exploración en los experimentos realizados.

## Abstract

In this work, we compare the performance of two techniques that use goal assignment to efficiently complete the task of exploring unknown scenarios using a homogeneous team of robots. We also consider the effect of exchanging targets between robots, considering parameters such as distance or orientation of robots. The techniques have been implemented in a simulator and tested with team of robots composed by variable number of robots in different scenarios. The results show that the exchange of goals contributes to improve the time of exploration in the experiments performed.

### Palabras Clave

Equipo multi-robots; Navegación; Construcción de mapas; Planificación; Intercambio de metas.

## INTRODUCCIÓN

La robótica es una de las áreas que más se han estudiado en el tiempo reciente, esto debido a que su campo de aplicación es muy amplio, repetición de acciones industriales monótonas, transporte autónomo, tareas de interacción con humanos, operaciones médicas de alta precisión, exploración de escenarios, navegación en ambientes peligrosos para el ser humano, tales como zonas de desastre, entre otros. Debido a esto los problemas que presenta son muy variados y de una gran complejidad.

Uno de los problemas más importantes dentro del área de la robótica es crear un mapa mientras el robot se mueve y posiciona dentro de un entorno, realizándolo de la manera más rápida y eficiente posible. Dentro de la comunidad robótica, a esta problemática se le conoce como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [1]. Para completar esta tarea en la actualidad se ha optado por utilizar no un sólo robot [3], sino un equipo de robots para poder realizar la tarea de manera más rápida [2], [7]. Sin embargo, el introducir más robots genera nuevos aspectos que deben ser tomados en consideración, como lo son: la redundancia en las trayectorias, la asignación de metas, la evasión de choques entre miembros del equipo, y la comunicación de los robots, entre otros.

Por lo tanto, puede decirse que si se tiene un equipo de robots el problema a resolver es la coordinación de dicho equipo. Para solventarlo, en la literatura podemos encontrar distintos enfoques, Nagavarapu et al. [4] proponen un enfoque descentralizado, en el cual los robots no tienen una comunicación directa. En [5] se presenta un estudio comparativo para equipos de robots donde cada robot realiza una exploración óptima de manera individual, es decir utilizando un enfoque descentralizado.

Dentro de la coordinación de equipos multi-robot uno de los puntos más importantes es la asignación de metas. Se han propuesto diversas técnicas sobre cómo asignar metas a un equipo robótico. Por ejemplo, en [6] se propone un sistema de asignación basado en mercado, en el cual se permite a los robots intercambiar objetivos.

La contribución de este trabajo es presentar un estudio comparativo entre dos técnicas de asignación de metas: el caso trivial de una asignación aleatoria, así como una asignación de metas en la frontera de las celdas ya exploradas por los robots. Además, se propone un método de intercambio de metas, el cual pretende mejorar la eficiencia en el tiempo de exploración.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Sea un escenario desconocido a explorar  $S$  por un equipo de  $n$  robots  $T = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  que comparten las siguientes características:

- Equipo de robots homogéneo.
- Robots de accionamiento diferencial.
- Sensor tipo LRF con radio de visión de  $180^\circ$  hacia el frente.
- Rango de comunicación total a lo largo del escenario.

En el instante inicial, a cada robot se le asigna una posición libre aleatoria dentro del escenario. La posición de cada robot en la  $k$ -ésima iteración se definirá mediante el conjunto  $P^k = \{p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k\}$  donde la posición  $p_1^k$  corresponde al robot  $R_1$ , la posición  $p_2^k$  corresponde al robot  $R_2$  y así sucesivamente.

Con el fin de completar la exploración del escenario al equipo  $T$  se le asigna un conjunto de metas  $G^k = \{g_1^k, g_2^k, \dots, g_n^k\}$ , donde la meta  $g_1^k$  corresponde al robot  $R_1$ , la posición  $g_2^k$  corresponde al robot  $R_2$  y así sucesivamente.

Para la construcción del escenario se eligió una representación utilizando una rejilla de ocupación, la cual consiste en una descomposición del entorno en celdas cuadradas de igual tamaño [3].

## Algoritmo de exploración de escenarios

En la Fig. 1 se muestra el pseudocódigo de nuestro sistema. Además, se explica paso a paso el funcionamiento del mismo.

```

{01} while Mapa incompleto
{02} Pk = Actualizar posiciones( )
{03} Gk = Asignar metas (Pk, Sk)
{04} for all Ri | i ∈ {1, 2, ..., n}
{05}   Planificar ruta (pik, gik)
{06}   while (pik ≠ gik)
{07}     if (! Colisión(pik, Sk))
{08}       Ejecutar trayectoria( )
{09}     else
{10}       Planificar ruta (pik, gik)
{11}     end if
{12}   end while
{13} k++
{14} end while

```

Figura 1. Pseudocódigo de exploración.

En el paso 2 se determina el vector de posiciones  $P^k$  que contiene las posiciones de los  $n$  robots. A continuación, se obtiene el vector de metas  $G^k$  en el paso 3, ésta sección se analizará más adelante, pues aquí es donde se encuentra la contribución de este trabajo. En el paso 5 encontramos la parte de planificación, para el robot  $R_i$  se planifica una ruta desde su posición actual  $p_i^k$  hasta su respectiva meta  $g_i^k$ . A continuación, si el robot  $R_i$  no encuentra algún obstáculo en su ruta (paso 7), el robot ejecuta su trayectoria hasta llegar a la meta en el paso 8, en caso contrario, en el paso 10 el robot planificará de nueva forma tomando en cuenta su nuevo conocimiento del escenario  $S$ .

- *Planificación de trayectorias*

Para este trabajo se utilizó el algoritmo de planificación  $a^*$ , el cual, planifica la ruta óptima para llegar a la meta basándose en las distancias que existen entre una celda y otra y determinando el camino de menor longitud. Sin embargo, dado que el robot no conoce todo el escenario, es necesario que la planificación se realice de manera dinámica, como en [8], [9].

### Asignación de metas

- *Asignación aleatoria*

Para cada robot  $R_i$  se asigna una meta  $g_i^k$ , la cual se obtiene de manera aleatoria con la única restricción de que la celda asignada  $g_i^k$  no haya sido explorada con anterioridad. En caso de que la meta sea explorada por cualquier miembro del equipo  $T$  se asigna una nueva meta.

- *Asignación en la frontera*

Para cada robot  $R_i$  se asigna una meta  $g_i^k$ , tal que  $g_i^k \in B$ . Donde  $B^k$  es un conjunto de celdas frontera entre la zona conocida y la inexplorada por el equipo en la  $k$ -ésima iteración tal que  $B^k \subset S^k$ . Así como en el caso anterior la celda asignada  $g_i^k$  no debe haber sido explorada con anterioridad. En caso de que la meta sea explorada por cualquier miembro del equipo  $T$  se asigna una nueva meta.

- *Intercambio de metas*

Dado un conjunto de metas  $G^k$ , se procede a reordenar la asignación de cada meta  $g_j^k$  en función del costo que le toma al robot  $i$  llegar a la meta  $j$ . El costo se calcula dependiendo de la distancia euclidiana que existe entre  $p_i^k$  y  $g_j^k$ , la diferencia entre la orientación actual del robot y la orientación de la línea que se forma entre  $p_i^k$  y  $g_j^k$ , y considerando si existe algún obstáculo entre el robot  $i$  y la meta  $j$ . Habiendo calculado todos los costos se reasigna la meta minimizando el costo para cada robot, obteniendo un vector  $G^{k'}$  con las metas reasignadas.

### Restricciones del sistema de exploración

Es importante mencionar que para el presente trabajo se parte de la suposición de que todos los robots conocen su posición exacta en el mapa, es decir, el problema que resulta de la localización de los robots dentro del mapa está resuelto. También se omite el error que pueda existir debido al movimiento mismo de los robots.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El enfoque descrito en la sección anterior fue probado a través de un simulador en los escenarios que se muestran en la Fig. 2. Dichos mapas fueron elegidos por su tamaño, no superior a los 32 x 32 m, y por la distribución de los obstáculos, que presenta similitudes con entornos reales.

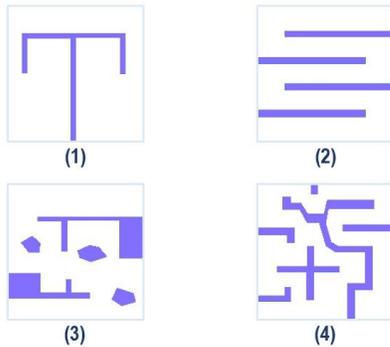


Figura 2. Escenarios probados en la simulación, tomados del repositorio *Motion Planning Maps* de la Universidad Técnica de Praga [10].

En la Tabla 1 se presentan los resultados numéricos del tiempo (en iteraciones) tomado para una exploración total de los escenarios para los tipos de asignación de metas descritos en la sección anterior: asignación aleatoria (A), asignación aleatoria con intercambio de metas (AR), asignación en la frontera (F) y asignación en la frontera con intercambio de metas (FR).

Tabla 1. Comparación del promedio de tiempo de exploración para varios métodos de asignación de metas.

Escenario	# Robots	A	AR	F	FR
1	1	16872		5307	
	2	9722.3	6456.3	2993.3	3021
	4	4648.7	2665	1774.3	1623.7
2	1	5864.3		2353.7	
	2	3467.7	2857	1642.3	1397.7
	4	2936.3	1399.3	1024.3	998.3
3	1	5227		2926	
	2	2947	2503.3	1741	1587.3
	4	2116.7	1388	1036.3	1024.3

4	1	18991		6213	
	2	11300	8286.3	4094	4131
	4	4980.3	3966.7	2714.7	2324

Como puede observarse en la Tabla 1, los resultados son mejores cuando la asignación se realiza en la frontera (F) con respecto a la asignación aleatoria (A). Además, el intercambio de metas también produce una mejora considerable. Esto debido a que la reasignación evita que los robots deban cruzarse en camino a sus metas intermedias, reduciendo con ello las distancias que deben recorrer y por ende reduciendo el tiempo de exploración total. Sin embargo, la mejora de tiempo de la asignación FR con respecto a la de la asignación F no es tan grande.

Se realizó la misma prueba 30 veces para cada uno de los escenarios y cada uno de los métodos. En la Fig. 3 se muestra la distribución de dichas pruebas para el método de asignación de metas en la frontera con intercambio (FR).

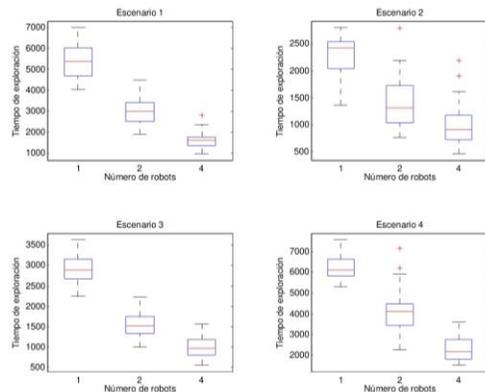


Figura 3. Tiempo requerido para completar la exploración en los escenarios propuestos.

Como puede observarse, en los escenarios más grandes 1 y 4 se encuentran los tiempos mayores. De la Fig. 3 también se observa que conforme se aumenta el número de robots el tiempo de exploración disminuye de forma considerable.

También debe notarse que para el escenario 2 y 4 existen pruebas en las cuales el tiempo de exploración fue excesivamente alto. Esta variación, con respecto al grueso de las pruebas puede deberse a casos donde el equipo deja pequeñas zonas sin explorar muy separadas entre sí (usualmente en las esquinas de los escenarios), lo cual hace que la navegación sea redundante. Esta situación se vuelve crítica cuando los escenarios son de mayor tamaño.

De los resultados mostrados en la Tabla 1 se observa que el método de asignación FR es de 1.8 a 3.2 veces mejor que la asignación aleatoria A, obteniendo los mejores resultados en los escenarios de mayor tamaño.

## CONCLUSIONES

De los resultados mostrados en la sección anterior podemos ver que el intercambio de metas, y de forma general la coordinación de equipos robóticos, otorga mejores resultados que un enfoque no coordinado. El tamaño del equipo también representa una variable importante para disminuir tiempos de exploración.

El sistema propuesto considera distancias y orientaciones para la reasignación, logrando mejorar el rendimiento comparado con métodos que no consideran la coordinación entre robots. El sistema logra tiempos de exploración entre 1.8 y 3.2 veces mejores que los de una asignación aleatoria. Así mismo, el intercambio de metas también ayuda a evitar colisiones frontales entre robots en corredores o pasos estrechos. A pesar de ello existen distintos aspectos a considerar.

Un punto de mejora para el sistema propuesto sería que al momento de calcular los costos se tome en cuenta las distancias de la ruta planificada en lugar de la distancia euclidiana, para así hacer una mejor reasignación. Otro punto a mejorar es evitar la situación descrita en la sección anterior, que los robots no dejen celdas sin explorar en zonas muy aisladas. Se debe probar como afecta la posición inicial de los robots, es decir, que pasa si todos los miembros del equipo comienzan en una misma posición.

## REFERENCIAS

- [1] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
- [2] Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C., & Schneider, F. E. (2005). Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Transactions on robotics*, 21(3), 376-386.
- [3] Čikeš, M., Đakulović, M., & Petrović, I. (2011, October). The path planning algorithms for a mobile robot based on the occupancy grid map of the environment—A comparative study. In *Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2011 XXIII International Symposium on* (pp. 1-8). IEEE.
- [4] Nagavarapu, S. C., Vachhani, L., & Sinha, A. (2016). Multi-Robot Graph Exploration and Map Building with Collision Avoidance: A Decentralized Approach. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 83(3-4), 503-523.
- [5] Frank, S., Listmann, K., Haumann, D., & Willert, V. (2010, November). Performance analysis for multi-robot exploration strategies. In *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots* (pp. 399-410). Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Hawley, J., & Butler, Z. (2013). Hierarchical distributed task allocation for multi-robot exploration. In *Distributed autonomous robotic systems* (pp. 445-458). Springer Berlin Heidelberg.
- [7] Stachniss, C. (2009). Coordinated multi-robot exploration. *Robotic Mapping and Exploration*, 43-71.
- [8] Likhachev, M., Ferguson, D. I., Gordon, G. J., Stentz, A., & Thrun, S. (2005, June). Anytime Dynamic A\*: An Anytime, Replanning Algorithm. In *ICAPS* (pp. 262-271).
- [9] Koenig, S., & Likhachev, M. (2002). D\* Lite. *AAAI/IAAI*, 15.
- [10] Intelligent and Mobile Robotics Group (2009). Motion planning maps. Department of Cybernetics, Czech Technical University. Recuperado el 18 de julio de 2017 de <http://imr.ciirc.cvut.cz/planning/maps.xml>.