

Implementación de un sistema de comunicación para un sistema de enjambres de robots

Célimo Porrás-Aguilar

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ celimojosepa@estudiantec.cr

Juan Carlos Brenes-Torres

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
Estudiante doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial
Universidad Politécnica de Valencia, España
✉ juanbrenes@tec.ac.cr

Rebeca Solís-Ortega

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ rsolis@tec.ac.cr

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un proyecto para seleccionar y desarrollar un sistema de comunicación entre robots de un enjambre. Se implementó como parte del proyecto Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres (PROE) y se abordó la limitación del sistema de comunicación existente en donde se daba una interpretación inadecuada de las señales por parte del enjambre. Como resultados, se creó un nuevo sistema de comunicación, un protocolo de inicio para el enjambre y un comportamiento colectivo para los experimentos del laboratorio.

Palabras clave

Enjambre de robots, Agregación, Comportamiento colectivo, Filtro de Kalman, protocolo TDMA.

Introducción

La robótica de enjambres se inspira en los comportamientos que presentan los sistemas de enjambre en la naturaleza. Busca crear sistemas descentralizados por medio de la interacción de un gran grupo de agentes autónomos [1]. Un sistema robótico de enjambre debe cumplir con ciertas propiedades [2,3]:

- **Autonomía:** ser capaz de tomar decisiones en función de las entradas del entorno.
- **Capacidad limitada:** un robot es incapaz o ineficiente al realizar una tarea, pero cuando se hace de forma cooperativa es altamente eficiente.
- **Descentralizados:** no existe un líder.
- **Elevado número:** se debe intentar operar con elevados números de robots.
- **Homogeneidad:** se busca que los robots sean iguales o al menos similares entre ellos.
- **Estigmergia:** puede existir comunicación indirecta entre los robots.

Dentro de las fortalezas de un sistema de enjambre se destaca la escalabilidad y robustez. Si un robot falla el sistema puede continuar realizando su tarea [4].

El proyecto PROE (Planificación de Rutas Óptimas y Exploración por medio de Enjambres), se encuentra en su tercera etapa en el período 2022-2023 y está inscrito como proyecto de investigación ante la Vicerrectoría de Investigación del Tecnológico de Costa Rica. Tiene el objetivo de implementar un enjambre de robots físico para ser utilizado en diversas aplicaciones. Actualmente, se ha desarrollado un prototipo de robot terrestre para espacios controlados llamado Atta-Bot (Imagen 1. Prototipo Atta-Bot.) que ha sido utilizado para verificar y validar los algoritmos de exploración.



Imagen 1. Prototipo Atta-Bot.

Así, este proyecto buscó fortalecer las características que identifican un sistema de enjambre. Se implementó un protocolo de comunicación, un modelo matemático que permita identificar la posición de los robots a través del enjambre y un algoritmo de comportamiento colectivo.

Desarrollo de la solución.

El proyecto aborda dos problemas presentes: la localización de los robots se realiza por medio de odometría únicamente, y el enjambre robótico cuenta con un sistema de comunicación centralizado.

La solución abordada se divide en tres partes: la **localización** de los robots cercanos a través del enjambre, el **sistema de comunicación** y por último, el **algoritmo de comportamiento** a utilizar para validar las soluciones.

Localización

Para determinar la localización de los Atta-Bots se debe limitar la posición inicial de los robots (Imagen 2. Protocolo de inicio de los Atta-Bots.). Cuando se inicia el enjambre, cada robot mide la distancia a la que se encuentra su vecino, envía esa información a cada Atta-Bot y calcula el desplazamiento para realizar la transformación espacial de las coordenadas a un único sistema de referencia global.

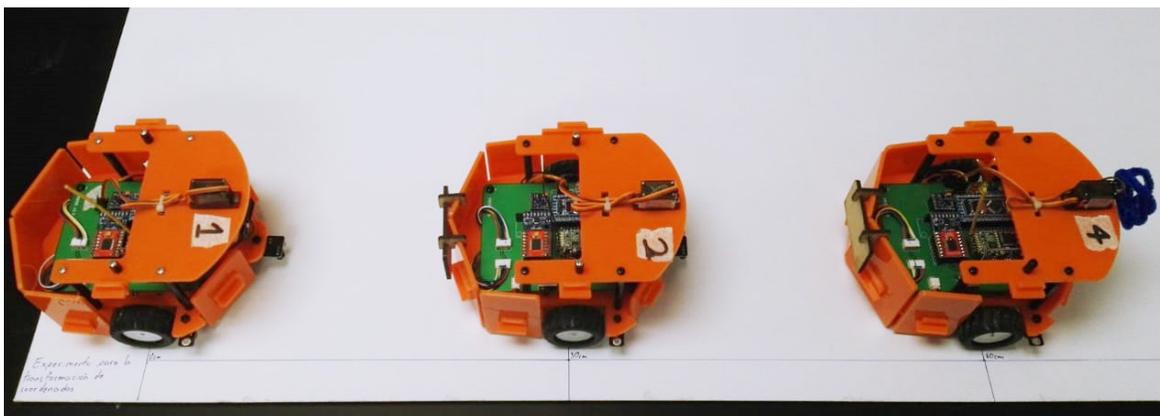


Imagen 2. Protocolo de inicio de los Atta-Bots.

Se implementa un filtro de Kalman para garantizar que la transformación de coordenadas se realice con precisión. Un filtro de Kalman se puede entender como un estimador de estados para una variable física. Tiene la característica de obtener información valiosa donde hay presencia de ruido en los datos. En este caso, permite reducir el ruido de los datos de orientación del magnetómetro. Esta clase de filtros pueden ser aplicados para estimar variables de estado en sistemas lineales o combinar sensores [5].

Sistema de comunicación

Al trabajar con comunicación por radiofrecuencia, el medio de acceso va a ser el mismo para todos los robots y se requiere un protocolo de acceso múltiple. El protocolo TDMA establece divisiones en el tiempo, donde sólo un nodo tiene permitido enviar información en cada ranura temporal [6] (Imagen 3. Modelo de un sistema TDMA.).

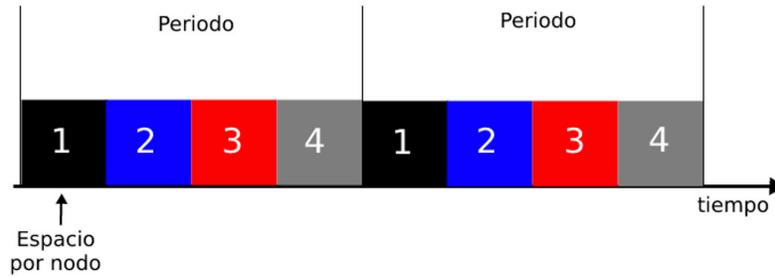


Imagen 3. Modelo de un sistema TDMA.

Para el sistema de comunicación, la solución toma como base el trabajo realizado por Barrantes-Jiménez [7]. Se realiza una depuración del código y se reorganiza el mensaje que envía los robots, (Imagen 4. Composición del mensaje enviado por los Atta-Bots.). Logran así reducir el largo del mensaje de 224 bits a 88 bits.

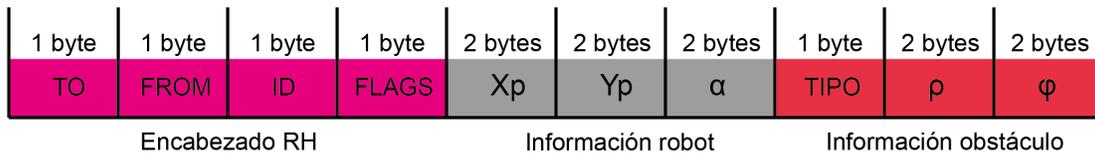


Imagen 4. Composición del mensaje enviado por los Atta-Bots.

Esta depuración permitió reducir la ventana de tiempo de 50 ms a 30 ms (Imagen 5. Comparación del tiempo de espera para enviar el mensaje en función de la cantidad de robots.), incrementando la escalabilidad un 66.7%.

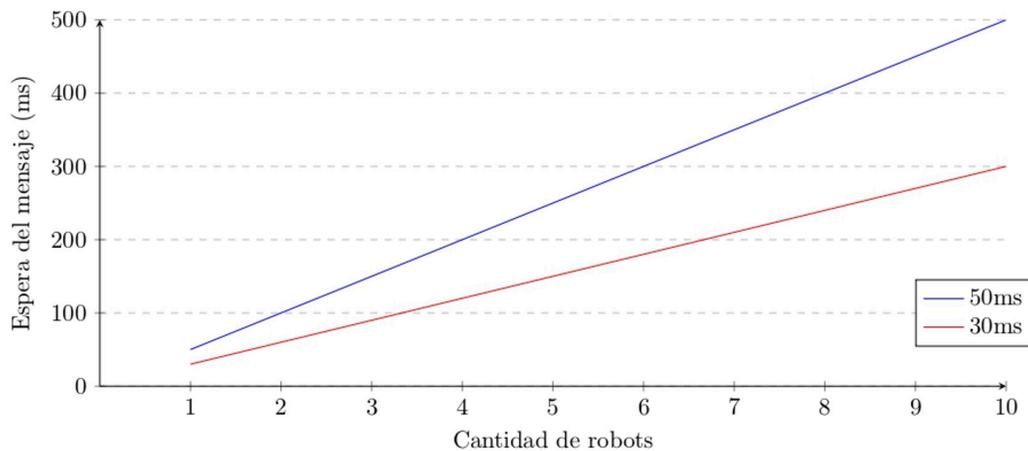


Imagen 5. Comparación del tiempo de espera para enviar el mensaje en función de la cantidad de robots.

Algoritmo de exploración colectivo

Al hablar de algoritmos de exploración colectiva se tiene un gran número de posibilidades, por ello se toma como base el algoritmo propuesto por Calderón-Arce y Solís-Ortega [8]. Para la validación se hizo una modificación de este algoritmo y se incorporó un objetivo común al sistema de enjambre, el cual consiste en encontrar una fuente de calor (Algoritmo 1. Algoritmo de detección fuente de calor y agrupación de los robots.).

```

entrada:  $\rho$ 
 $\alpha \leftarrow$  posición de la celda  $\rho$ ;
 $\tau \leftarrow$  dirección  $\rho$ ;
mientras no encuentra fuente de calor hacer
  para cada  $\rho$  hacer
     $\omega^t(\rho_i) \leftarrow i$  – estado de los vecinos al tiempo  $t$ ;
    si  $\exists \omega^t(\rho_i) = 0$  entonces
       $j$  : escoger una dirección vecina aleatoria;
       $\alpha \leftarrow \rho_j$ ;
    en otro caso
      si fuentes de calor detectada entonces
        salir ciclo;
      en otro caso
        Obstáculo detectado;
         $\tau \leftarrow$  escoger nueva dirección;
      fin
    fin
  fin
fin
fin
  Ir a la fuente de calor;
   $\alpha \leftarrow$  posición de la fuente de calor;

```

Algoritmo 1. Algoritmo de detección fuente de calor y agrupación de los robots.

Resultados y Análisis

Al utilizar un filtro de Kalman en el proyecto, se reduce el ruido de la señal del magnetómetro y se pasa de tener un error en la orientación del robot, de hasta 5° a 2° aproximadamente. Además, se obtiene que las mediciones son robustas ante grandes perturbaciones como se presenta en la Imagen 6. Lectura del magnetómetro en movimientos rectos con el uso del filtro de Kalman..

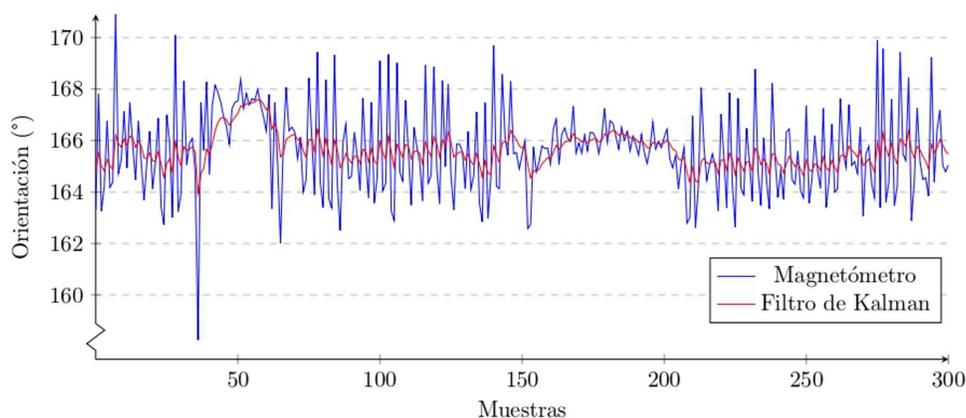


Imagen 6. Lectura del magnetómetro en movimientos rectos con el uso del filtro de Kalman.

Validación del algoritmo de exploración colectiva

Para la validación del algoritmo se realiza un experimento con 3 robots donde se determina el porcentaje de estos que realizan de manera exitosa el algoritmo. La Tabla 1. Porcentaje de éxito del comportamiento colectivo presenta un resumen de los resultados obtenidos en el experimento. Los videos de las pruebas se pueden obtener en [9].

Tabla 1. Porcentaje de éxito del comportamiento colectivo

Velocidad	Cantidad de robots	% Éxito
120 mm/s	3	80,00
170 mm/s	3	66,67

En el experimento los robots se van distribuyendo en el escenario (Imagen 7) y cuando detectan una fuente de calor los demás robots se desplazan hacia esa localización.

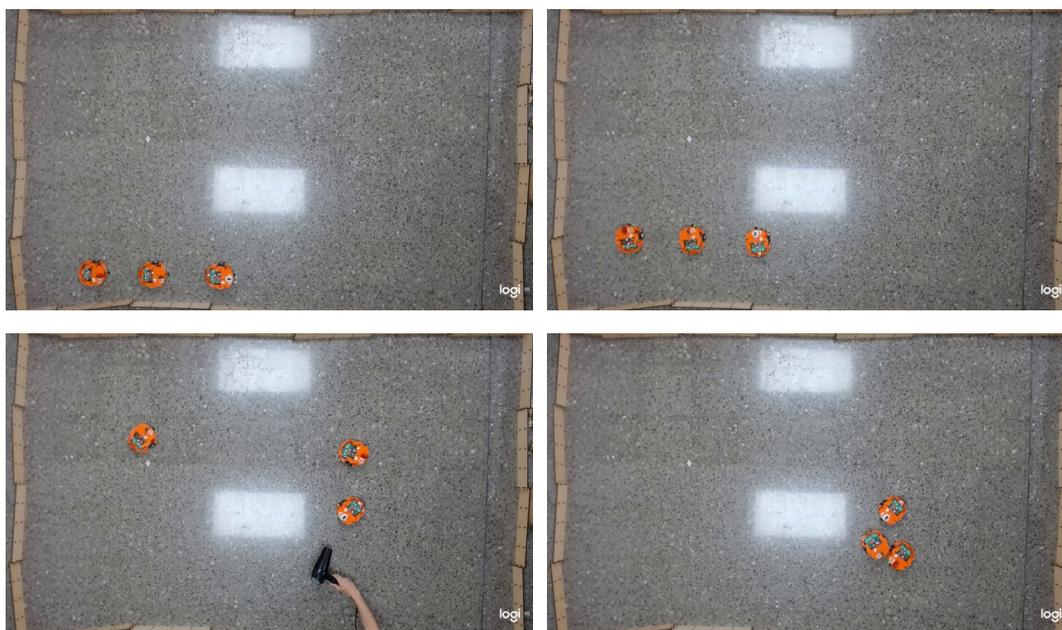


Imagen 7. Línea de tiempo de una validación del comportamiento colectivo.

Al final del experimento se determina que los Atta-Bots tienen un mejor desempeño con una velocidad de avance de 120 mm/s.

Conclusiones

Se implementa un sistema de comunicación semi descentralizado que mejora la tasa de bits actual del robot.

Mediante la implementación de un filtro de Kalman se redujo el ruido presente en las lecturas del magnetómetro y se contribuyó a la reducción del error en la orientación del robot.

Por último, se implementa un nuevo algoritmo de comportamiento colectivo que contempla dos enfoques, por un lado, la exploración colectiva y por el otro la agregación.

Agradecimientos

Los resultados presentados son parte del proyecto "Atta-Bots: Adaptaciones, comportamientos y funcionalidades en el marco de los proyectos PROE" (código 5402-1440-5101). Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (VIE-ITCR) su apoyo y soporte.

Referencias

- [1] Calderón-Arce, C., Brenes-Torres, J. C., & Solis-Ortega, R. (2022). Swarm Robotics: Simulators, Platforms and Applications Review. *Computation*, 10(6), 80.
- [2] Brenes-Torres, J. C., Blanes, F., & Simo, J. (2022). Magnetic Trails: A Novel Artificial Pheromone for Swarm Robotics in Outdoor Environments. *Computation*, 10(6), 98.
- [3] M. S. Tortosa, "Agentes y enjambres artificiales: modelado y comportamientos para sistemas de enjambre robóticos," Tesis doct., Universitat d'Alacant-Universidad de Alicante, 2014
- [4] B. Khaldi y C. Foudil, "An Overview of Swarm Robotics: Swarm Intelligence Applied to Multi-robotics," *International Journal of Computer Applications*, vol. 126, págs. 31-37, sep. de 2015. doi: 10.5120/ijca2015906000.
- [5] Y. Kim y H. Bang, "Introduction to Kalman Filter and Its Applications," en nov. de 2018, isbn: 978-1-83880-536-4. DOI: 10.5772/intechopen.80600.
- [6] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.
- [7] Barrantes-Jiménez, C. A. (2019). Diseño e implementación de rutinas de navegación y comunicación para un robot móvil utilizado en sistemas multirobot de enjambre. URI: <https://hdl.handle.net/2238/13423>
- [8] C. Calderon-Arce y R. Solis-Ortega, "Swarm Robotics and Rapidly Exploring Random Graph Algorithms Applied to Environment Exploration and Path Planning," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, n.o 5, 2019. doi: 10.14569/IJACSA.2019.0100586. DOI: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100586>.
- [9] Porras, Celimo. (2022, Octubre 26). *PFG - PROE - Pruebas exploración colectiva* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/playlist?list=PLL8d7RJbR13i1iUhg_XiJzwMRFQryW0fS

Sobre los autores

Célimo Porras-Aguilar

Célimo Porras Aguilar es ingeniero en Mecatrónica graduado del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Participó como asistente del proyecto de investigación PROE, adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión.

Juan Carlos- Brenes

Juan Carlos Brenes es profesor e investigador en el Área Académica Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Posee una maestría en Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente es estudiante del doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial por la misma universidad. <https://orcid.org/0000-0001-6323-2173>

Rebeca Solís-Ortega

Rebeca Solís Ortega es docente, investigadora y extensionista en la Escuela de Matemática del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Es máster en Ciencias de la Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-3065-8386>