

Enjambres de robots y sus aplicaciones en la exploración y comunicación

Rebeca Solís-Ortega
Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
rsolis@itcr.ac.cr

Resumen—En este artículo se expone el tema de enjambres de robots desde su conceptualización y características hasta algunas de sus posibles aplicaciones en ámbitos como la exploración de terrenos y comunicación de rutas.

En el caso de exploración de escenarios y comunicación de rutas se presenta una propuesta basada en algoritmos cooperativos descentralizados que permite la organización independiente de los agentes que conforman un enjambre mediante comunicación local y directa con el medio ambiente en que se desenvuelven, por medio de un esquema de huella virtual, mejor conocido como feromonas. Además se muestran los resultados preliminares obtenidos al ejecutar dicho algoritmo en ambientes estáticos.

Index Terms—Enjambre de robots, algoritmos cooperativos, exploración, comunicación

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas computacionales que involucran el uso de un robot individual para que opere dentro de un determinado ambiente con el fin de llevar a cabo ciertas tareas, se han ido dejando de lado para dar cabida a sistemas que involucren una gran cantidad de robots simples y pequeños, con el fin de minimizar costos, optimizar la ejecución de tareas, tener un sistema tolerable a fallos, que sea flexible y fácilmente escalable. A este tipo de sistemas robóticos se le conoce como enjambres de robots ([1], [2], [3]).

Si bien los enjambres traen consigo un gran potencial para resolver problemas como lo son: control de tráfico, formaciones en movimiento, exploración, mapeo, búsqueda y rescate, simulación de escenarios y comportamientos biológicos, planificación de rutas, entre muchos otros [2], [4], [5]; en el presente artículo nos enfocaremos en dos aplicaciones concretas de los enjambres: la exploración eficiente (en cuanto a tiempo de duración) de una zona desconocida y comunicación de una ruta hacia un objetivo para converger en una posible aplicación hacia la automatización del proceso de la cosecha de la fresa.

El problema de exploración y comunicación de una ruta ha sido abordado por diversos autores ([2], [3], [4]) los cuales han propuesto varios métodos para resolverlo utilizando tanto robots individuales como múltiples; sin embargo la complejidad de algunos sistemas se incrementa de acuerdo con el número de robots utilizados, por eso es importante crear sistemas paralelos, escalables, flexibles y tolerantes a fallas. Para lograr un algoritmo que cumpla con dichas

características, se presenta una propuesta bio-inspirada, basada en un modelo de feromonas repelentes y atrayentes, y la teoría de autómatas celulares, para lograr un algoritmo de exploración y comunicación eficiente.

Y si bien son muchas las áreas en las cuales se pueden utilizar los enjambres de robots y los algoritmos de la exploración de zonas y comunicación de rutas y datos, nos centraremos en la relacionada con la cosecha de la fresa. Este es un proceso particularmente difícil y hasta el momento ha sido conducida por trabajadores calificados, que pueden manejar este producto sin dañarlo y seleccionar aquellos que se encuentran en óptimas condiciones. Debido a este factor y otros como la cantidad de tiempo total requerida para la cosecha, las condiciones de trabajo y el esfuerzo requerido para identificar y seleccionar las fresas adecuadas, la automatización de dicho proceso permitirá aumentar la eficiencia del mismo ([6], [7]). Hasta ahora varios investigadores han intentado realizar dicha automatización ([6], [8], [9], [7], [10] [11]), todos ellos se han enfocado en el uso de un sólo robot, por eso en este artículo nos enfocaremos en una propuesta basada en un enjambre de robots que se encarguen de explorar una zona de cultivo, analizar por medio de imágenes computacionales el estado de los frutos para poder determinar el momento óptimo de cosecha y comunicar los datos encontrados con el fin de proceder de manera automática a la recolecta de los mismos.

A continuación se profundizará un poco más en cada uno de estos temas.

II. ENJAMBRES DE ROBOTS

Los enjambres de robot tienen su origen en el concepto de inteligencia de enjambres, el cual fue introducido por Beni y Wang en 1989 en su investigación sobre agentes simulados auto-organizables en el contexto de sistemas robóticos celulares [2]. La inteligencia de enjambres consiste en un énfasis biológicamente inspirado, donde el control descentralizado y la comunicación local propician la aparición de un comportamiento global como resultado de la auto-organización de los individuos que lo componen, ejemplo de esto son los comportamientos presentados por las hormigas, termitas, abejas, aves, peces, lobos y otros animales similares [4]. Así, en su definición más sencilla, los enjambres de robots son la

aplicación de la inteligencia de enjambres a los principios de los robots colaborativos.

II-A. Características

A pesar de las diversas definiciones sobre lo que es y representa un enjambre de robots, existe un consenso general sobre las características que debe tener un grupo de robots para ser considerado un enjambre. A continuación, se presenta un compendio de dichas características según lo presentado en [2], [3], [4]:

1. **Simplicidad:** se refiere a como están contruidos los robots y de las necesidades de hardware que requieren para su funcionamiento, pues esto les permitirá responder de manera rápida y flexible a los cambios del ambiente en que se encuentren [2].
2. **Autonomía:** Se busca que los robots no sean controlados central ni remotamente, por servidores o seres humanos, aunque pueden existir miembros “líderes” en el enjambre que decidan las acciones generales de otros individuos.
3. **Control del sistema:** El sistema bajo el cual trabaja el enjambre puede darse de dos maneras *centralizado* o *descentralizado* [4].
4. **Comunicación:** La comunicación de los robots es fundamental para la organización y cumplimiento eficiente de la tarea que deben realizar. Se pueden encontrar tres tipos de formas en las cuales se puede dar la comunicación entre los diversos robots, entre estos encontramos interacción a través de: *el medio ambiente, de sensores, y de comunicaciones* [3], [4].
5. **Inspiración biológica:** dado el origen de los enjambres de robots, se desea que su comportamiento esté, en cierto sentido, biológicamente inspirado. Existe un debate abierto sobre que tanto un enjambre debe esta relacionado con los comportamientos biológicos por lo que se han creado dos corrientes [2]: *enfoque minimalista:* en el cual las características físicas y de comunicación de los robots deben limitarse a un nivel mínimo y *enfoque tecnológico:* en el cual se incentiva a utilizar algunas de las capacidades especializadas ofrecidas por la electrónica moderna.

II-B. Ventajas de los enjambres de robots

Entre las ventajas de utilizar enjambres de robots mencionadas principalmente por Tan y Zheng en [3] y también en [2], [4]. Tenemos:

1. **Paralelismo:** Debido a que el tamaño de la población de un enjambre es bastante grande, los robots pueden dividirse para realizar múltiples tareas al mismo tiempo.
2. **Escalabilidad:** Si se da una comunicación local dentro del enjambre, esto permitirá que varios individuos puedan unir o salir de las actividades que se estén realizando sin interrumpir el esquema general del enjambre.

3. **Estabilidad:** Le permite al sistema en general no verse afectado, si una parte del enjambre deja las actividades debido a factores externos.
4. **Económico:** Pues el costo de crear y mantener robots pequeños es relativamente bajo cuando se compara con el de un robot de gran tamaño y complejidad.
5. **Flexibilidad:** Debido a que un mismo enjambre puede realizar diferentes tareas con el mismo hardware con que cuentan o bien con pequeñas modificaciones del mismo. De igual manera el grupo de robots pueden cambiar estrategia de acuerdo al medio ambiente en que se encuentren para lograr el cumplimiento del objetivo de manera más eficiente.

III. PROPUESTA: ALGORITMO PARA LA EXPLORACIÓN DE ZONAS Y COMUNICACIÓN DE RUTAS

Marcel et al. [12] nos indican que la tarea de cubrir de manera óptima un ambiente desconocido usando agentes “inteligentes” es un problema NP-Hard (o NP-complejo), debido a esto autores en [12], [13], [14] utilizan enfoques aproximados para resolver dicho problema. Estos enfoques resultan más prácticos debido a su capacidad de proporcionar soluciones casi óptimas en un corto período de tiempo y sin necesidad de procesar todo el espacio de búsqueda (como sucede con los métodos exhaustivos).

Basándose en estos enfoques aproximados y tomando como base las características y ventajas de los enjambres de robots se propone un algoritmo cooperativo basado en marcadores virtuales (feromonas) para poder realizar la exploración de zonas y comunicación de una ruta hacia un objetivo, siguiendo un esquema de agentes simples, autónomos, bajo un sistema centralizados, con comunicación local a través del medio ambiente y una inspiración biológica minimalista.

Para modelar el entorno de trabajo del enjambre se modeló el ambiente de trabajo bajo un esquema de autómatas celulares de 2-dimensiones con vecindario de Von Neuman. Mientras que para la comunicación local se utilizaron “huellas virtuales”, en donde se destacaron las relacionadas con la estigmergia [15], el cual consiste en una forma particular de comunicación indirecta utilizada por los insectos sociales para coordinar sus actividades.

Los agentes del enjambre se mueven bajo un modelo básico de random walk [12], y dejan en el ambiente marcas virtuales de dos tipos:

- **Repelentes:** Indican a los otros robots del enjambre que dicho camino ya fue o está siendo analizado, por lo que deben tomar otra ruta a analizar.
- **Atrayentes:** Indican a los otros agentes que ya se ha encontrado una ruta hacia un objetivo, por lo cual se debe comunicar esta trayectoria para hacer converger a los agentes al sitio deseado.

Así se puede decir que los robots del enjambre se encuentran en todo momento en uno de dos modos: **exploración** en la cual van dejando feromonas repelentes en el ambiente y su movimiento random varía de acuerdo a la intensidad de la feromona repelente que se encuentren en sus alrededores y **comunicación** en el cual ya los agentes han encontrado un objetivo y se dedican a dejar cierta cantidad de feromona atrayente para comunicar la ubicación del mismo.

En la figura 1 se puede observar un esquema general del algoritmo.

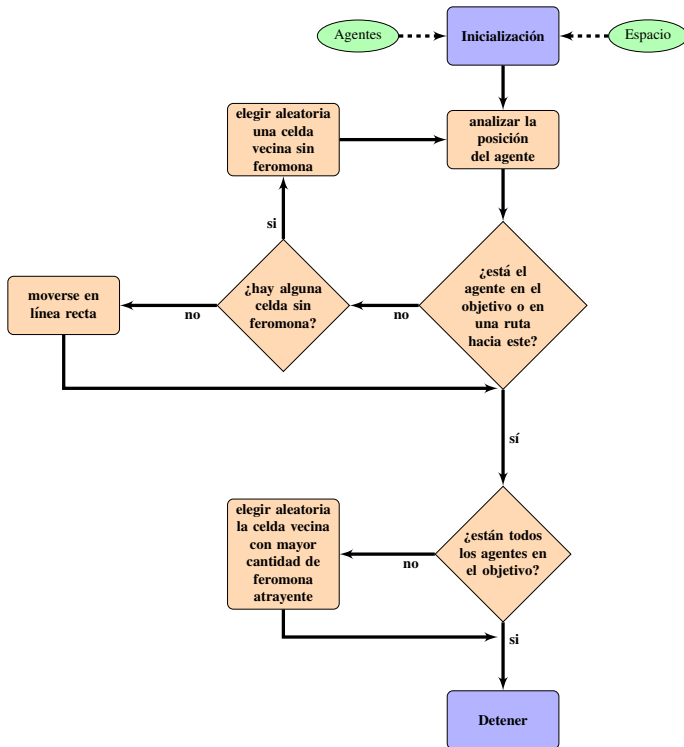


Figura 1. Esquema del algoritmo para la exploración de una zona y comunicación de una ruta hacia un objetivo.

III-A. Primeros resultados

Para poner en practica el algoritmo propuesto se realizó una simulación en el software Processing 3.0, donde se creó un ambiente estático que incluía varios obstáculos, un objetivo y un enjambre de robots; todos ellos representados por diferentes figuras geométricas. Un ejemplo de dicho ambiente se puede visualizar en la Figura 2.

Para medir la eficiencia del algoritmo se decidió no utilizar como medida de tiempo la duración del algoritmo sino la cantidad de iteraciones que el enjambre debía realizar hasta converger hacia el objetivo, esto con el fin de evitar el sesgo de los resultados asociados al procesador de los equipos en los que se realizaban las primeras pruebas.

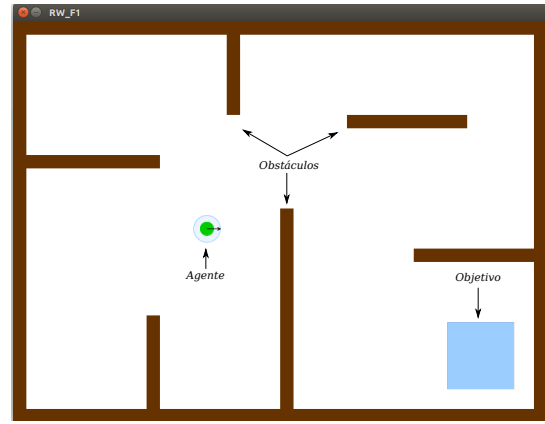


Figura 2. Ejemplo de la simulación del ambiente.

Se utilizó el algoritmo base de random walk como referencia para comparar los resultados encontrados. Además se programó el uso de 10 robots que componen el enjambre y se realizaron 10 repeticiones de cada uno de los modelos.

Entre los resultados preliminares obtenidos, se tiene que el algoritmo propuesto reduce alrededor de un 80 % el tiempo de convergencia y crea datos con una dispersión significativamente menor (Ver Cuadro I).

Cuadro I. Resultados preliminares al ejecutar el algoritmo propuesto con el algoritmo de random walk.

	Algoritmo base	Algoritmo propuesto
Tiempo medio	2101.4	403.8
Dispersión de los datos	475.3	64.1

Si bien se muestra una mejora sustancial en cuanto al tiempo de convergencia, se deben continuar realizando pruebas para determinar los parámetros idóneos en cuanto a intensidad de feromona, cantidad de pasos de comunicación al objetivo y estudiar distintos patrones de comportamiento que puedan surgir con el fin de mejorar el algoritmo propuesto.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó a gran escala las características y alcances del uso de enjambres de robots en aplicaciones como la exploración de zonas, comunicación de rutas y una posible expansión al tema de la cosecha de frutos como la fresa.

Para la primera parte de exploración y comunicación se presentó el diseño de un algoritmo cooperativo con enjambres de robots, haciendo uso de un enfoque basado en feromonas, donde los marcadores repelentes se utilizan para dispersar de una manera eficiente y veloz a los individuos de un enjambre mientras que las atrayentes permiten comunicar el camino hacia dicho objetivo de manera eficiente. Con base a las pruebas realizadas se logró concluir que:

- La intensidad y la tasa de dispersión de la feromona afectan significativamente el rendimiento del sistema, por lo cual es necesario encontrar los valores que minimizan el tiempo de búsqueda y comunicación de objetivos. Sin embargo estos valores dependen del ambiente y la cantidad de individuos que se tengan.
- Entre más agentes trabajen más rápido convergerá el algoritmo, pero también las diferencias con métodos más sencillos de implementar serán cada vez menores.

V. INVESTIGACIONES EN CURSO Y TRABAJO FUTURO

Existen muchas aplicaciones en las cuales se pueden utilizar los algoritmos de exploración y comunicación utilizando enjambres de robots y cuya investigación se encuentra en curso o en la etapa de formulación, en esta sección comentaremos algunas de ellas:

- **Cosecha de frutos:** Esta aplicación está siendo analizada para la formulación de una investigación cuyo objetivo será la automatización de la cosecha de frutos como la fresa. Hasta el momento la gran mayoría de la cosecha de esta fruta se da de manera manual, y requiere de mucho cuidado y precisión por parte de los recolectores y representa una tarea que consume al rededor del 50 % del total de los gastos de producción [7]. Por lo que la automatización del proceso reduciría en gran medida los gastos asociados e incrementaría las ganancias de los agricultores. Si bien varios investigadores, en especial en la zona de Asia, han estado trabajando en la creación de prototipos y máquinas que permitan la automatización del proceso de cosecha, con el fin de aumentar la eficiencia del mismo, [6], [8], [9], [7], [10] y [11], todos ellos se han enfocado en el uso de un sólo robot que se encargue del proceso, lo que implica que se construyan robots muy complejos, costosos y den cabida a un sistema no tolerable a fallos. Por esto se puede analizar la posibilidad de crear un enjambre de robots que permita resolver de manera eficiente el problema en cuestión, dicho enjambre tendrá la labor de *Explorar, mapear y cubrir la zona, recolectar y analizar la información sobre el estado de los frutos, cosechar los frutos que se encuentren en condiciones óptimas.*
- **Planificación de rutas óptimas de acceso y/o evacuación por medio de un enjambre centralizado:** Este tema se relaciona con un proyecto de investigación vigente en el ITCR y consiste en el desarrollo de un algoritmo cooperativo centralizado que permita explorar de manera eficaz un entorno desconocido, por medio de un enjambre simulado de agentes. De manera simultánea, se implementará un algoritmo para el procesamiento y análisis de la información recolectada, con el fin de lograr construir un mapa de la zona; con el fin de utilizar algoritmos de optimización multiobjetivo para la determinación de rutas óptimas, de evacuación y/o acceso, utilizando superficies de seudorespuesta y/o

enjambre de partículas para disminuir el costo y el tiempo computacional de dicha optimización.

- **Vigilancia costera:** Esta aplicación también está siendo analizada para la formulación de un proyecto de investigación cuyo objetivo será la creación de un enjambre de drones que se encarguen del monitoreo de la zona costera, con el fin de determinar “intrusos”, crear alertas y rutas eficientes para que la guardia costera puedan llegar de manera precisa y rápida a inspeccionar las anomalías que el enjambre haya divisado.

REFERENCIAS

- [1] G. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes, “A taxonomy for swarm robots,” in *Intelligent Robots and Systems’ 93, IROS’93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, 1993, pp. 441–447.
- [2] A. J. Sharkey and N. Sharkey, “The application of swarm intelligence to collective robots,” *Advances in applied artificial intelligence*, p. 157, 2006.
- [3] Y. Tan and Z.-y. Zheng, “Research advance in swarm robotics,” *Defence Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 18–39, 2013.
- [4] Y. Mohan and S. Ponnambalam, “An extensive review of research in swarm robotics,” in *Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on*. IEEE, 2009, pp. 140–145.
- [5] L. L. Grant and G. K. Venayagamoorthy, “Swarm intelligence for collective robotic search,” in *Design and Control of Intelligent Robotic Systems*. Springer, 2009, pp. 29–47.
- [6] F. Dimeas, D. V. Sako, V. C. Moulaniotis, and N. Aspragathos, “Towards designing a robot gripper for efficient strawberry harvesting,” in *Proceedings of 22nd International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-RAAD, Portoroz, Slovenia*, 2013, pp. 220–226.
- [7] K. Zhang, T. Zhang, and D. Zhang, “Synthesis design of a robot manipulator for strawberry harvesting in ridge-culture,” in *Intelligent Robot Systems (ACIRS), Asia-Pacific Conference on*. IEEE, 2016, pp. 114–117.
- [8] S. Hayashi, K. Shigematsu, S. Yamamoto, K. Kobayashi, Y. Kohno, J. Kamata, and M. Kurita, “Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test,” *Biosystems engineering*, vol. 105, no. 2, pp. 160–171, 2010.
- [9] L. L. Hannemann, “Design and testing of an autonomous ground robot for agricultural applications,” 2016.
- [10] S. Puttemans, Y. Vanbrabant, L. Tits, and T. Goedemé, “Automated visual fruit detection for harvest estimation and robotic harvesting,” in *IPTA2016 proceedings*, no. submitted, 2016.
- [11] T. Coen and J. Anthonis. (2017) Octinion, engineering the future. [Online]. Available: <http://octinion.com/products/harvesting-series/strawberry-picking-robot>
- [12] M. Antal, I. Tamas, T. Cioara, I. Anghel, and I. Salomie, “A swarm-based algorithm for optimal spatial coverage of an unknown region,” in *Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 7–13.
- [13] F. Fossum, J.-M. Montanier, and P. C. Haddow, “Repellent pheromones for effective swarm robot search in unknown environments,” in *Swarm Intelligence (SIS), 2014 IEEE Symposium on*. IEEE, 2014, pp. 1–8.
- [14] R. Morlok and M. Gini, “Dispersing robots in an unknown environment,” in *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Springer, 2007, pp. 253–262.
- [15] M. Dorigo, E. Bonabeau, and G. Theraulaz, “Ant algorithms and stigmergy,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, no. 8, pp. 851–871, 2000.