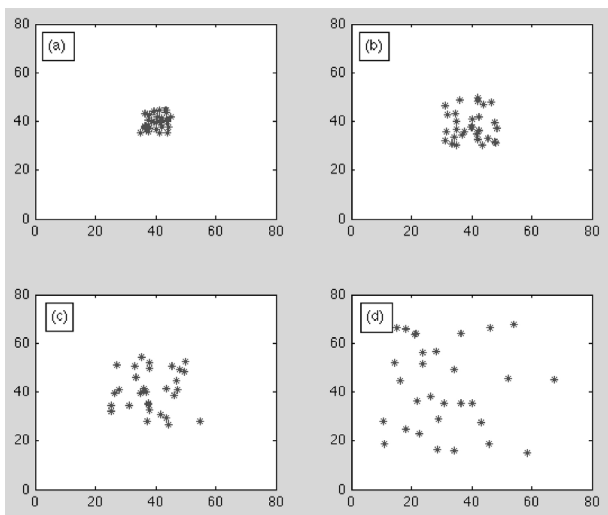


Distribución espacial de agentes autónomos basada en la teoría de forrajeo para aplicaciones de vigilancia y monitoreo

ÉDGAR FRANCISCO ARCOS HURTADO*
JESÚS ALFONSO LÓPEZ SOTELO**

Resumen

Se presenta el modelo de un sistema multi-agente para llevar a cabo tareas de vigilancia en un terreno desconocido, en el cual un equipo de agentes autónomos, a partir de reglas simples, se distribuye en el terreno de tal manera que no existan porciones o áreas del mismo que no estén siendo monitoreadas o vigiladas. Este modelo se aplica a la exploración de un cultivo virtual de plantas, al que inicialmente se afecta con un algoritmo de difusión de un hongo fitopatógeno. Mediante simulaciones se puede observar el desempeño del equipo de agentes, teniendo en cuenta la dispersión en distintos tamaños del cultivo simulado y la cantidad de objetivos de búsqueda encontrados (plantas infectadas por el hongo fitopatógeno). Finalmente, de acuerdo con las simulaciones realizadas, se puede concluir que bajo reglas simples, optimizadas –a partir de la quimiotaxis de las bacterias– y con un grado de cooperación dado por su estado, emerge una distribución de los agentes en la que cada uno explora una región del terreno,



(*) Universidad Autónoma del Caribe. Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: edgar.arcos@uac.edu.co.

(**) Miembro IEEE. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia. Correo electrónico: jalopez@uao.edu.co.

Este documento se ha construido a partir de la ponencia del mismo nombre presentada por los autores en el “I Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización”, organizado por el Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Occidente, con el apoyo del Capítulo ACOFI de los programas de Ingeniería Mecatrónica y de Automatización. El documento es inédito.

Fecha de recepción: 18/04/2013 • Fecha de aceptación: 30/04/2013.

según el tamaño y la cantidad de agentes en el mismo.

Palabras claves: forrajeo, control cooperativo, sistema multi-agente.

Abstract

In order to mitigate the plant diseases caused by fungal pathogens, this work presents the design of a control strategy based on a multi-agent system supported by data clustering techniques and computational geometry. Initially, the problem lies in monitoring a crop to give a report on the status of the plants for a disease caused by a fungus is concerned. This procedure is performed by a simulated agents representing rovers, which, from simple rules based on bacterial chemotaxis, are responsible for surveying the whole field. With the information provided by these explorers agents, performing a clustering of most infected areas, then performing a virtual division of the land through a Voronoi diagram to create different regions where each one will correspond a number of agents to eradicate the disease, these agents responsible for mitigating disease represent sprayers robots, as these agents are distributed in the infected areas is based on the ideal free distribution with which is achieved that the number of robots of each area according to the size of that region and thus more quickly to eradicate the disease that affects the crop.

Keywords: multi-agent systems, cooperative control, Ideal Free Distribution (IFD), distributed decision making, Voronoi diagrams, clustering.

1. Introducción

La cooperación hace que los seres vivos se desenvuelvan en distintos escenarios de manera eficiente; estos aprovechan sus capacidades para llevar a cabo una serie de tareas que les permitan alcanzar un objetivo común al grupo. El hecho de que ciertas tareas se desarrollen de manera colectiva, se debe principalmente al grado de complejidad que estas presentan cuando un solo individuo intenta resolverlas; desde este punto de vista, algunos animales pueden asegurar su supervivencia buscando alimentos de modo que maximicen una

función de tipo E/T, donde E es la energía obtenida y T el tiempo empleado buscando la fuente que brinda esa energía (comida) (Passino, 2005). Este proceso es conocido como forrajeo (Stephens & Krebs, 1986; Houston & McNamara, 1999), en el cual, a partir de una estrategia seleccionada, un individuo o un grupo de individuos puede mejorar significativamente su utilidad, vista como la cantidad de alimento adquirida para poder sobrevivir. En este sentido, es claro ver el forrajeo como un proceso que han perfeccionado algunas especies a través de la evolución para asegurar su estadía en un hábitat, en el que otras especies menos favorecidas por su estrategia han desaparecido. El forrajeo, por lo tanto, involucra un proceso de optimización en el que están presentes variables como el tipo de dieta, el nivel de riesgo presente en la búsqueda de comida, o si el proceso se debe llevar a cabo de manera individual o colectiva, etc. (Andrews, Passino & Waite, 2007).

Aquí, el problema abordado hace referencia a la tarea de vigilancia en un terreno desconocido, en donde agentes autónomos, siguiendo reglas simples, se deben distribuir de manera eficiente con el objetivo de analizar todo un terreno y entregar un informe acerca del estado del mismo; el uso de un sistema multi-agente se debe al empleo de las capacidades que este tipo de sistema puede ofrecer en la solución de tareas complejas (Uny Cao, Fukunaga & Kahng, 1997; Murphey & Pardalos, 2002).

2. Modelo del sistema multi-agente

2.1 Generalidades

Definimos agentes exploradores como los encargados de llevar a cabo la tarea de forrajeo en todo el terreno. Se denota a n_e como el número de agentes que integran el sistema multi-agente. Cada agente explorador R_{ei} , $i=1,2,\dots,n_e$, está equipado con un sensor radial isotrópico de radio r_p , que le permite identificar objetivos de búsqueda. A cada agente se le asigna un radio de búsqueda r_c , que depende del tamaño del terreno y de la cantidad de agentes disponibles para explorar el mismo. El objetivo es, entonces, que no hayan agentes exploradores en los que sus radios de búsqueda se intercepten. Por otra parte, el movimiento de cada agente está determinado por el parámetro paso p_{Re} y el ángulo de orientación β_p . En este sentido, p_{Re} es la mínima trayectoria que puede realizar un agente, y β_p el ángulo de orientación al que decidió dar ese paso.

2. 2 Reglas de exploración

Para una distribución eficiente de los agentes, estos pueden tener dos posibles estados: el estado explorando y el estado trasladando. En el estado explorando cada agente está en una zona del terreno en donde ningún otro agente interfiere con su rango de búsqueda, y en el estado trasladando un agente ha detectado la presencia de otro en su región de búsqueda y toma la decisión de trasladarse a otra zona del terreno. Así, si la posición de un agente explorador es un par ordenado (x_i, y_i) , y si la distancia que existe entre un agente i y un agente j , es:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - y_i)^2 + (x_j + y_j)^2} \leq r_c \mid \exists j \in [1, n_e] \mid j \neq i$$

Entonces los agentes i y j están buscando en zonas que tienen puntos en común; dado este caso, el agente i deberá desplazarse a buscar objetivos en otra zona, solamente si el robot j no está en estado de traslado. Así, formalmente, si $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - y_i)^2 + (x_j + y_j)^2} \leq r_c \mid \exists j \in [1, n_e] \mid j \neq i \mid j_{estado} = explorando$, el agente i debe desplazarse. De esta manera, el agente i escoge un ángulo aleatorio $\beta_p \in [0, 360^\circ]$ y un número de pasos n_p para abandonar la zona de búsqueda donde interfería con el robot j . Aquí se asume que un agente i conoce el estado de un agente j si $d(i,j) < r_c$; así, un agente no necesariamente debe conocer el estado del total de sus compañeros en todo instante, este solo debe conocer el estado del agente con el cual su rango de búsqueda se intercepta, a fin de tomar una decisión que permita la emergencia de una distribución eficiente en el terreno.

2. 3 Optimización de los movimientos

La idea de distribuirse completamente en todo el terreno significa maximizar la distancia que existe entre todos los agentes exploradores (ecuación 1), donde $d(i,j)$ es la distancia que existe entre el agente i ubicado en la posición (x_i, y_i) y el agente j ubicado en la posición (x_j, y_j) .

$$distancia = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n d(i,j) \right)$$

Por otra parte, cuando:

$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - y_i)^2 + (x_j + y_j)^2} \forall j \in [1, n_e], j \neq i$, sea mayor que el rango r_c , entonces el agente explorador entra en estado explorando. En este estado, un agente puede escoger un ángulo de

orientación diferente para cada paso; sin embargo, esto podría dar lugar a que un agente en estado explorando tomara datos de objetivos de búsqueda en un espacio muy pequeño, el cual depende del paso p_{Re} del agente. Para eliminar este efecto se ha optado por una estrategia de exploración basada en la quimiotaxis de las bacterias (Liu & Passino, 2002); así los objetivos de búsqueda encontrados hacen parte importante es su estado explorando. En primer lugar, un agente no cambiará su ángulo β_p en cada paso, β_p cambiará cada vez que el agente agente lleve a cabo una establecida cantidad de pasos p_{change} ; esto asegura que el agente no se mantenga alrededor de un punto fijo. Por otra parte, si un agente encuentra un objetivo de búsqueda, entonces, este se seguirá desplazando con ese mismo ángulo β_p , hasta que su cantidad de pasos realizados sea p_{change} y no encuentre otro objetivo. Es importante aclarar que un agente explorador R_{ei} sensa los puntos a su alrededor que están en un radio de cobertura r_p en ambos estados (explorando o trasladando) y además en cada paso; de este modo, un objetivo p_x es detectado por un agente i cuando

$d_{i,p_x} = \sqrt{(x_i - x_{p_x})^2 + (y_i + y_{p_x})^2} \leq r_p$ siendo d_{i,p_x} la distancia que hay entre el agente i y el objetivo de búsqueda p_x . En el proceso de forrajeo, los agentes pueden alternar entre el estado explorando y trasladando; esto implica que un agente, a partir de un traslado realizado que le permita llegar a una zona donde no se encuentran otros agentes y pueda estar en estado explorando, no vuelva a hallarse en estado de traslado. Esto se puede presentar debido a que un agente en estado explorando puede invadir la zona de otro agente explorador.

Finalmente, los agentes exploradores entregan una matriz de objetivos de búsqueda encontrados $P_e = (p_{xi}, p_{yi}) \mid i=1:n_{pe}$, donde n_{pe} es el número de objetivos de búsqueda hallados y (p_{xi}, p_{yi}) son las coordenadas de cada objetivo encontrado.

3. Aplicación

El modelo desarrollado del sistema multi-agente para llevar a cabo la tarea de forrajeo, es evaluado en un terreno simulado como un cultivo de plantas que sufre la infección de un hongo fitopatógeno; esta aplicación se desarrolla con el ánimo de simular una posible solución a problemas agrícolas, como en el estudio de Grift

(2007), donde un grupo de robots realiza las tareas necesarias para mantener la producción de un determinado cultivo.

3. 1 Modelo de difusión de un hongo fitopatógeno

El modelo de difusión del hongo fitopatógeno simulado está basado en el propuesto por Xu y Ridout (1998); aquí, la propagación de la enfermedad se lleva a cabo en un cultivo compuesto por n_r filas, donde cada una de estas tiene n_c plantas, la distancia entre plantas adyacentes en una misma fila es d_c , y la distancia entre filas es d_r . Cada planta está compuesta por n_s unidades (hojas), y todas están expuestas a la enfermedad. La epidemia empieza por una unidad infectada, ya sea en una o varias plantas. Cuando una unidad se infecta, entra en un periodo de latencia t_L (formación del micelio); una vez cumplido el periodo de latencia, la unidad infectada entra en un periodo de infección t_I , en el cual lanza esporas que pueden iniciar otras infecciones. Así, cuando se ha terminado el periodo de infección, la unidad infectada no produce más esporas. Durante el proceso de infección, además, las unidades infectadas producen esporas conforme a un proceso de Poisson con un parámetro de rata constante λ , llamado rata de esporulación. Las esporas producidas por una unidad infectada son independientes; esto significa que aquellas que son generadas por una unidad, finalmente podrán llegar a una ubicación distinta. Se asume que cada espora viaja en línea recta con un ángulo de orientación aleatorio, de acuerdo con una distribución uniforme; igualmente, la distancia a la que viaja la espora también varía aleatoriamente, obedeciendo a una distribución *half-cauchy* con un parámetro de dispersión μ ; de esta manera, la distancia d que recorre una espora en particular se simula tomando $d = \mu \tan(\pi x / 2)$, donde x es un número uniforme aleatorio en el intervalo $(0,1)$. Si una espora cae fuera del cultivo a una distancia mayor de $d_c/2$, entonces esta se ignora; de lo contrario, se asume que la espora cae en la planta más cercana y en una unidad escogida aleatoriamente con un número uniforme en un intervalo entre $(0, n_s)$. Si la unidad de la planta a la que llega la espora ya estaba infectada, entonces esta no tendrá ningún efecto; si se diera el caso contrario, esta comenzará su ciclo. Es importante mencionar que en muchas ocasiones la unidad infectada pertenecerá a la misma planta donde está la unidad en periodo de infección.

Este modelo de difusión de una enfermedad en un cultivo –debido a un hongo fitopatógeno–, se desarrolla en tiempo discreto, donde un evento de difusión e_d será un día transcurrido en el cultivo. De esta manera, el número de esporas producidas por una unidad infectada corresponderá a una variable aleatoria de característica Poisson con parámetro λ , que es la media de las esporas producidas por unidad infectada en un día.

Finalmente, el modelo entrega una matriz $A = \{(x_i, y_i) \mid i=1 : p_i\}$, indicando las plantas infectadas, donde p_i es un escalar que representa la cantidad de plantas infectadas, y (x_i, y_i) representa la posición de la planta i infectada.

4. Simulación y resultados

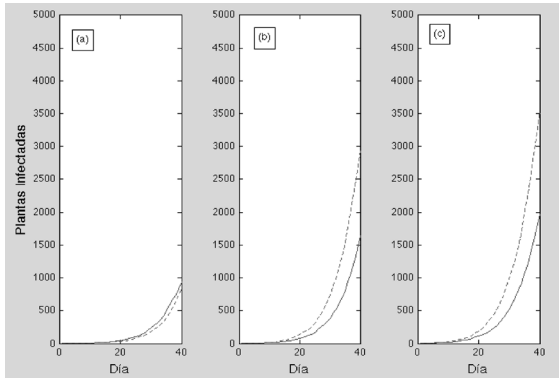
4. 1 Difusión del hongo fitopatógeno

Los parámetros que intervienen el modelo de difusión del hongo y con los cuales se realizaron las pruebas, son:

- Filas del cultivo n_r
- Plantas por fila n_c
- Distancia entre plantas adyacentes $d_c = 1m$.
- Distancia entre filas $d_r = 1m$.
- Unidades que componen una planta $n_s = 30$
- Periodo de latencia $t_L = 5$ días
- Periodo de infección $t_I = 10$ días
- Rata de esporulación λ
- Media de dispersión μ
- Cantidad inicial de plantas infectadas $I_{inicial}$

Atendiendo al criterio de simplicidad y considerando que el objetivo de este trabajo es analizar el desempeño del sistema multi-agente, solo se presenta una simulación (Figura 1) con variaciones limitadas de los parámetros de difusión del hongo, como se nombraron anteriormente.

Figura 1. Evolución de una enfermedad en un cultivo producida por un hongo fitopatógeno. $n_r=80, n_e=80, \mu=1.5$ (-azul), 4.0 (-rojo) y $\lambda=0.4$ en (a), $I_{inicial}=3$, en (b), $I_{inicial}=5$, y en (c) $I_{inicial}=8$



Fuente: elaboración propia.

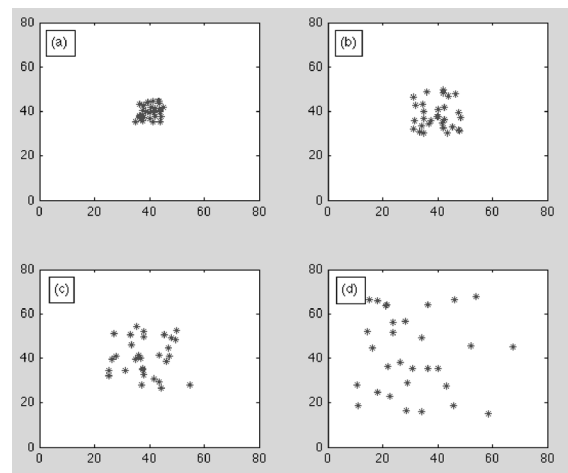
De acuerdo con la Figura 1, se puede observar que debido a la cantidad inicial de plantas infectadas $I_{inicial}$, la tasa de esporulación λ y el parámetro de dispersión μ , la enfermedad en un cultivo se puede difundir de manera exponencial sobre todo el terreno, afectando cada vez una mayor cantidad de plantas; además, es posible apreciar que el parámetro más influyente es μ , debido a que al poder afectar plantas no muy cercanas a un foco actual de la enfermedad, se crean otros focos, los cuales podrían iniciar su ciclo de infección y finalmente afectar todo el cultivo. Es importante mencionar que en cuanto mayor sea la tasa de esporulación λ , mayor será el número de plantas infectadas en el cultivo, debido a que la cantidad de esporas producidas por unidad infectada aumenta.

4. 2 Agentes exploradores

La tarea de estos agentes consiste en explorar todo el terreno y entregar un informe de las plantas infectadas; en este sentido, es importante que los agentes se distribuyan de manera eficiente, con el fin de explorarlo todo. La idea de una posible distribución eficiente equivale a que cada agente explore una zona del cultivo, así el cultivo virtualmente se divide en zonas iguales, donde a cada región formada le debe corresponder un agente explorador; esta es la distribución de agentes exploradores que se espera alcanzar con el modelo del sistema multi-agente propuesto, en el que, alternando entre sus estados explorando y trasladando, se irán acercando cada vez más al patrón deseado.

Los parámetros que intervienen en el modelo de los agentes exploradores son: (i) el número de agentes a explorar, (ii) el paso p_{Re} , (iii) el rango del sensor r_p , y el tamaño del cultivo que se estableció previamente. En la Figura 2 se muestra la evolución del equipo de agentes autónomos, en cuanto a la dispersión en todo el terreno se refiere. La curva que representa la suma de las distancias que separan todos los agentes se muestra en la Figura 3.

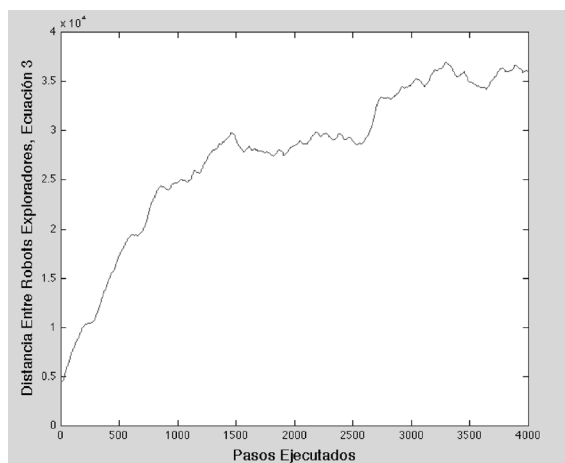
Figura 2. Evolución de la dispersión de 30 agentes exploradores en un terreno de 80 x 80 m, el número total de pasos N_{TP} en (d), $N_{TP}(d) > N_{TP}(c) > N_{TP}(b) > N_{TP}(a)$, $p_{Re}=0.1$ m.



Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de observar el comportamiento de distintas cantidades de agentes en diferentes tamaños de cultivos, se realizaron pruebas con 5, 10, 15, 20 y 25 agentes en cultivos de 40 x 40, 60 x 60 y 80 x 80 m.

Figura 3. Curva de dispersión para 30 agentes exploradores en un terreno de 80 x 80 m, $p_{Re}=0.1 m$.



Fuente: elaboración propia.

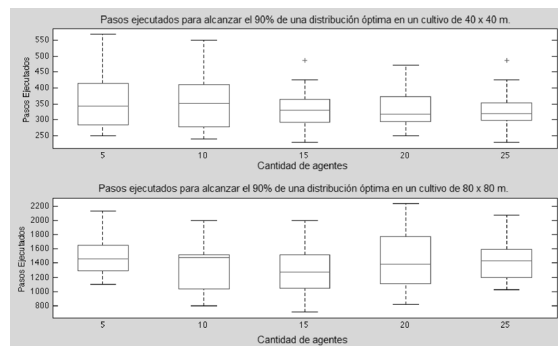
En la Figura 4 cada conjunto de datos representa simulaciones con los parámetros indicados. En todas estas pruebas el paso de los robots se mantuvo constante ($p_{Re} = 0.1 m$). Así mismo, las gráficas nos indican que el tiempo que gastan los robots exploradores en alcanzar el 90% de una distribución eficiente no depende de la cantidad de los mismos, pero sí del tamaño del cultivo; sin embargo, es un proceso en el que puede variar significativamente la cantidad de pasos para alcanzar una distribución eficiente, cuando el tamaño del cultivo aumenta, ya que el movimiento a realizar por cada robot (agente), responde a un proceso estocástico donde no se asegura que un agente siempre se dirija a una zona del cultivo que no esté siendo explorada por otro robot. Finalmente, en la Figura 5 se puede ver el resultado de distintas simulaciones, en las cuales cada grupo de datos proporciona información acerca de la cantidad de objetivos de búsqueda encontrados bajo tamaños distintos del sistema multi-agente y además la cantidad de pasos utilizados para encontrar ese número de objetivos.

5. Conclusiones

A través de simulaciones fue posible comprobar que, bajo reglas simples y con un grado de cooperación dado por su estado, los agentes exploradores se pueden distribuir en todo un terreno, logrando de esta manera realizar una búsqueda más extensiva de objetivos de interés. Los agentes exploradores pueden maximizar una función que equivale a la suma de las distancias

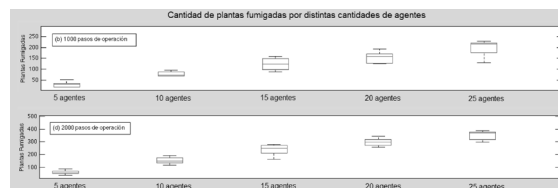
entre todos los agentes, acercándose cada vez más a una posible distribución eficiente, en la que cada agente tiene una zona de exploración. Por otra parte, inspiradas en la quimiotaxis de las bacterias, las reglas que definen el movimiento de los agentes en el estado explorando, garantizan que estos no estén siempre alrededor de un punto fijo, sino que puedan explorar una mayor cantidad de sitios, dependiendo de los objetivos de interés encontrados en el transcurso del proceso de forrajeo, y los cuales representan para los agentes un posible camino a seguir para maximizar la cantidad de objetivos encontrados.

Figura 4. Cantidad de pasos para alcanzar el 90% de una posible distribución eficiente en diferentes tamaños de cultivos, y con cantidades distintas de agentes, $p_{Re} = 0.1 m$.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Cantidad de objetivos de búsqueda encontrados por distintas cantidades de robots para dos valores de pasos de operación (1000 y 2000 pasos de operación)



Fuente: elaboración propia.

6. Trabajo futuro

Es importante estudiar nuevos métodos para la búsqueda de objetivos de interés, a partir de diferentes estrategias, tales como: inteligencia de enjambres o algunas basadas en el comportamiento de leones para tareas de patrullaje (Haque, 2010), o algunas basadas en la teoría de juegos (Amigoni, Gatti & Ippedico, 2008),

donde se hace una representación de juegos, de forma extendida, para saber qué posición debe ocupar un determinado agente; de esta manera, se incrementa la utilidad del sistema multi-agente, disminuyendo la energía empleada en la tarea de vigilancia. Desde la perspectiva de la partición virtual del terreno, sería interesante estudiar estrategias donde las regiones no tengan un tamaño igual, sino que este sea una representación de la cantidad de posibles objetivos de búsqueda, lo cual da pie para implementar estrategias de *clustering* y de geometría computacional (diagramas de Voronoi). En este contexto, finalmente, se puede establecer un nuevo tipo de reglas para el sistema multi-agente, a partir, por ejemplo, de la idea de la distribución ideal libre (Quijano & Passino, 2006), obteniendo así una mayor eficiencia en el proceso. ●

Referencias

- Amigoni, F., Gatti, N. & Ippedico, A. (2008). A game-theoretic approach to determining efficient patrolling strategies for mobile robots. *Proc. IAT*, 2, 500-503. IEEE.
- Andrews, B. W., Passino, K. M. & Waite, T. A. (2007). Foraging theory for autonomous vehicle decision-making system design. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 49, (1), 39-65.
- Grift, T. (2007). Robotics in crop production. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Taylor & Francis.
- Haque, M. (2010). Sustainable group sizes for multi-agent search-and-patrol teams. *Mathematical Theory of Networks and Systems*. Budapest, Hungary.
- Houston, A. & McNamara, J. M. (1999). *Models of adaptive behaviour*. Cambridge University Press.
- Liu, Y. & Passino, K. M. (2002). Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: Models, principles, and emergent behaviors. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 115, (3), 603-628.
- Murphey, R. & Pardalos, P. M. (2002). *Cooperative control and optimization*. Boston: Kluwer Academic.
- Passino, K. M. (2005). *Biomimicry for optimization, control, and automation*. London: Springer Verlag.
- Quijano, N. & Passino, K. M. (2006). *Optimality and stability of the ideal free distribution with application to temperature control*. American Control Conference. IEEE.
- Stephens, D. W. & Krebs, J. R. (1986). *Foraging theory*. Princeton University Press.
- Uny Cao, Y., Fukunaga, A. S. & Kahng, Andrew. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4, (1), 7-27.
- Xu, X. M. & Ridout, M. S. (1998). Effects of initial epidemic conditions, sporulation rate, and spore dispersal gradient on the spatio temporal dynamics of plant disease epidemics. *Phytopathology*, 88, (10), 1000-1012.