

ALGORITMOS DE RASTREO INSPIRADOS EN COLONIAS DE HORMIGAS

Álvaro Gutiérrez Martín, Felix Monasterio-Huelin Maciá
Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT), aguti@etsit.upm.es

Luis Magdalena Layos
European Centre for SoftComputing

Resumen

La Robótica Cooperativa mediante el uso de *Enjambres Robóticos*, también conocidos como *Swarm Robotics*, es un campo de aplicación que se encuentra en pleno auge. Dentro de este campo, el modelado del comportamiento basado en las colonias de hormigas ofrece nuevas líneas de investigación en el estudio de los comportamientos emergentes.

La implementación de sistemas de localización de comida bioinspirados en las hormigas lleva asociada problemas de fusión sensorial, debido al gran número de sistemas de percepción existentes en la naturaleza. En el presente trabajo se ofrece una visión global de comportamientos emergentes basados en la característica más conocida de las hormigas, el seguimiento/deposición de feromonas.

Palabras clave: hormigas, comportamientos emergentes, feromonas, enjambre, swarm robotics.

1. INTRODUCCIÓN

El artículo se enmarca en el ámbito de los algoritmos bioinspirados aplicados a la robótica, dentro de la tesis doctoral de uno de autores [1]. Para la realización de la tarea de búsqueda se han implementado diferentes algoritmos basados en comportamientos de la familia de las hormigas. Los algoritmos bioinspirados se encuentran en pleno desarrollo, utilizándose para la solución de diferentes problemas tanto algorítmicos como robóticos. Concretamente, los algoritmos inspirados en la deposición de feromonas, atendiendo al comportamiento de las hormigas, han tenido varias implementaciones en los problemas de TSP, QAP, ... [5]. Sin embargo, aunque se han llevado a cabo trabajos en los que se pretenden realizar coberturas completas de un entorno desconocido basándose en la deposición de sustancias químicas ("marcando el terreno") [15], se desconocen implementaciones robóticas reales que pretendan simular comportamientos similares a las hormigas con un conjunto complejo de sensores.

La mayoría de las especies de hormigas tienen

como principal fuente sensorial la capacidad de rastreo de feromonas que han ido dejando ellas mismas, convergiendo en un camino entre la fuente de comida y el hormiguero. Diferentes estudios realizados han dejado patente la convergencia de dicho camino en función de la distancia de la comida al hormiguero [8],[9],[4] y la evaporación de las sustancias químicas incluidas en las feromonas [6],[7], sin tener en cuenta otro tipo de sensorización.

En el presente trabajo se ha realizado un estudio preliminar sobre la necesidad de orientación de las hormigas para conseguir localizarse en el propio camino creado. Diversos trabajos publicados han mostrado que existen diferentes sistemas sensoriales que entran en juego en los comportamientos de las hormigas reales. Algunos de estos sistemas sensoriales se basan en la orientación por medio del sol [11], sistemas magnéticos y gravitacionales [13], [3] y sistemas de visión [14]. Recientes estudios apuntan también a la necesidad de un control de distancias por medio de la cuantificación de los pasos existentes entre el hormiguero y la comida [10]. Distintos experimentos demostrarán la necesidad de algún mecanismo añadido al de las feromonas para poder completar de manera satisfactoria la tarea de llevar la comida de vuelta al hormiguero.

2. EL MUNDO DE LAS HORMIGAS

Uno de los aspectos más característicos del comportamiento de las hormigas es la generación de caminos por medio de la deposición de ciertas sustancias químicas llamadas feromonas. Estas sustancias funcionan a modo de atractores para toda la colonia, generando al cabo del tiempo un camino real entre la fuente de alimentación y el hormiguero. Cuando en un instante inicial el camino no está creado, las hormigas comienzan a navegar erráticamente por el entorno, recorriendo las proximidades del hormiguero. Poco a poco estas hormigas se van alejando del mismo cubriendo gran parte de la superficie radial del mismo. Una vez que una hormiga encuentra una fuente de comida

regresa al hormiguero dejando un rastro de feromonas, que se va evaporando a lo largo del tiempo si no se depositan nuevas feromonas. Cuando otras hormigas encuentran dicho rastro se unen al mismo aumentando la concentración de feromonas. Esto implica que, una vez formados diferentes caminos, poco a poco irán desapareciendo los menos recorridos. Cuando las hormigas llegan al hormiguero con la comida, la depositan y continúan de nuevo el rastro para repetir la operación.

De lo anterior podemos extraer las siguientes conclusiones. La primera es que los caminos falsos hacia la comida o el hormiguero poco a poco irán desapareciendo gracias a las propiedades de evaporación de la feromona, mientras que los caminos que sí lleguen a establecer una comunicación entre la comida y el hormiguero serán los que perduren debido al tránsito de las hormigas por el mismo. Por otro lado, cabe la posibilidad de la creación de múltiples caminos hacia una o varias fuentes de comida, sin embargo, tal y como se observa en la naturaleza, únicamente uno de ellos será el que se perpetúe, ya que, siendo éste el más corto, dispondrá de mayor concentración de feromonas y será mayor atractor para la colonia.

3. IMPLEMENTACIONES

Para el desarrollo de los experimentos se ha partido del simulador realizado por I. Navarro [12], implementando en el mismo dos tipos de experimentos:

- *Localización Conocida del Hormiguero (LCH)*: En este experimento existen unas hormigas denominadas exploradoras que se encargan de localizar las áreas de comida. Una vez descubiertas vuelven al hormiguero (cuya localización es conocida) dejando un rastro de feromonas que servirá de atractor para las hormigas trabajadoras.
- *División en sectores de trabajo (DST)*: En este experimento no existen hormigas exploradoras, por lo que la vuelta hacia el hormiguero resulta ser aleatoria al igual que la búsqueda de la comida. Se ha añadido una peculiaridad de división del espacio de trabajo en sectores circulares para una rápida convergencia.

Existen ciertas características, tanto del espacio de trabajo en el simulador como de los robots-hormigas, comunes a ambos experimentos:

- El espacio de trabajo del simulador se ha discretizado para mayor facilidad de análisis a la hora de realizar la deposición y lectura de las

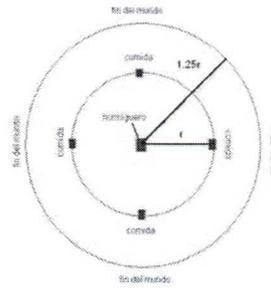


Figura 1: Espacio de trabajo de las hormigas.

feromonas por cada uno de los robots. A cada celda, dentro del espacio de trabajo, se le asigna inicialmente un número de feromonas igual a cero que irá modificándose conforme discorra el experimento.

- A cada robot se le asocia una dirección representada por un vector dentro del espacio de trabajo, que informa de los diferentes movimientos posibles en función de las implementaciones.
- Todos los cálculos algorítmicos se realizan para cada robot secuencialmente y la actualización del entorno se realiza una vez finalizados dichos cálculos. Por lo tanto, en cada unidad de tiempo se crean los movimientos de cada robot y se actualizan las variables a utilizar una vez concluido el mismo.
- El hormiguero es el origen de coordenadas.
- Las fuentes de comida se encuentran equidistantes del hormiguero en una situación simétrica con respecto a los ejes del sistema bidimensional.
- El espacio de trabajo o "mundo de las hormigas" ha sido limitado para ahorrar tiempo de cómputo, siendo el mismo un círculo de radio 1.25 veces la distancia del hormiguero a la comida, y considerando que ese "fin del mundo" es el momento en el que una hormiga se considera perdida.

Se puede observar una representación del espacio de trabajo en la Figura 1

3.1. LOCALIZACIÓN CONOCIDA DEL HORMIGUERO (LCH)

En este algoritmo las hormigas salen del hormiguero en busca de la comida con un movimiento aleatorio y con una función de exploración. Dicho desplazamiento permite cualquier movimiento de ± 90 con respecto a su vector dirección, como se

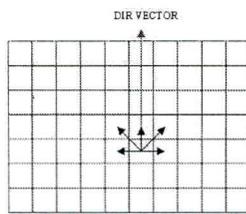


Figura 2: Movimientos permitidos en el LCH

puede apreciar en la Figura 2. Dada esta restricción en el movimiento del robot, se evita que se desplace hacia atrás, ofreciendo una visión realista del movimiento de las hormigas; aunque sí son permitidos probabilísticamente movimientos circulares tras cuatro unidades de tiempo.

Cuando una hormiga alcanza una zona de comida, es orientada hacia el hormiguero y va depositando 20 unidades de feromona por instante de tiempo y celda. Si alguna hormiga se cruza en su periodo de exploración con el camino de feromonas, comienza a seguirlo dejando su condición de exploradora por la de trabajadora. Dicha hormiga se dirigirá a la comida, recogerá una unidad de comida y volverá hacia el hormiguero dejando feromonas por dicho camino. Cualquier hormiga que se encuentre en el hormiguero observará las cantidades de feromonas existentes en las celdas contiguas y comenzará a seguir el punto de mayor feromona teniendo en cuenta las reglas de movimiento comentadas anteriormente.

Puesto que cualquier otra hormiga exploradora ha podido encontrar otra fuente de comida, existe la posibilidad de que se forme inicialmente más de un camino entre el hormiguero y las áreas de comida. Sin embargo, únicamente el camino de mayor concentración es el que se sigue, por lo que según avanza el tiempo sólo el camino más corto será el que perdure hasta que la comida se acabe. En los experimentos implementados, los depósitos de comida se encuentran a la misma distancia del hormiguero entre sí, por lo que el camino que perdurará será por el que transcurran mayor número de hormigas

Cuando una hormiga se encuentra con el fin de su espacio de trabajo, en el "fin del mundo", ésta gira 180 grados y continúa aleatoriamente con su movimiento en busca de comida.

En este primer experimento no se ha tenido en cuenta la evaporación de las feromonas, puesto que al encontrarse marcado el camino por las hormigas exploradoras, no es necesario implementar dicho comportamiento en el simulador para la convergencia del algoritmo.

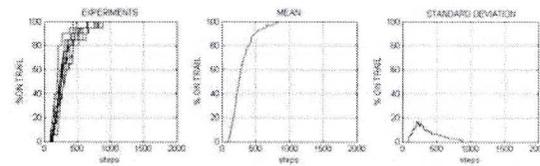


Figura 3: Resultado del LCH para una colonia de 20 hormigas.

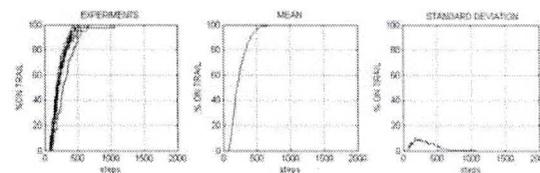


Figura 4: Resultado del LCH para una colonia de 40 hormigas.

La Figura 3 y Figura 4 muestran unas gráficas sobre los experimentos desarrollados, ofreciendo el tanto por ciento de hormigas que se encuentran siguiendo el rastro de un camino ya formado hacia la comida, la media de los experimentos y la desviación típica.

Los experimentos se han realizado bajo las siguientes restricciones:

- Número de áreas de comida: 4.
- Distancia de la comida al hormiguero: 50 pasos.
- Número de hormigas: 20 y 40.
- Radio del mundo: 60 celdas.

En la Figura 5 se observa una secuencia de movimiento para un experimento del algoritmo LCH para 20 hormigas.

El algoritmo ha sido implementado tal y como se detalla a continuación:

```

_____ NKR Algorithm _____
FOR each ant in world DO
  ant.position = nest
  ant.direction = random(0:45:360)
END FOR
/*Main Loop*/
WHILE(1)
  FOR EACH ant in world DO
    IF ant without food and on food area THEN
      pickup food;
      ant.direction = nest vector;
    END IF
    IF ant with food and on nest THEN

```

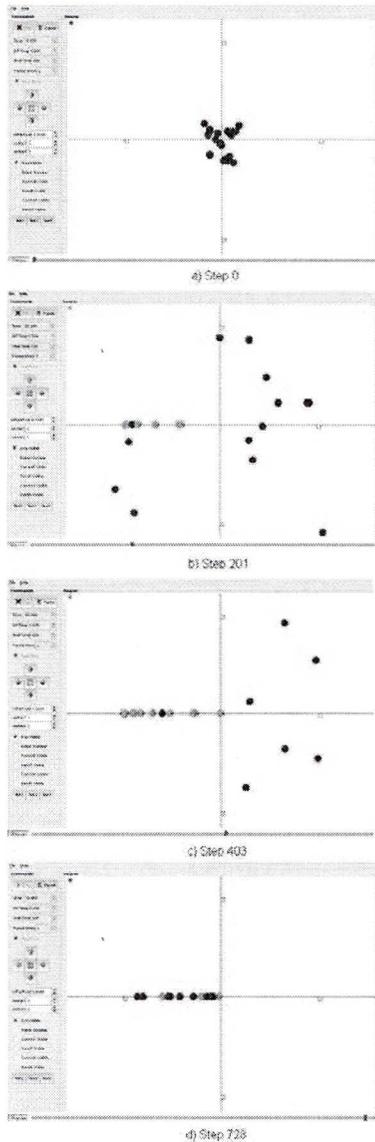


Figura 5: Secuencia del algoritmo LCH.

```

    Leave food;
    Follow pheromone trail;
END IF
IF ant out of world THEN
    ant.direction + 180°;
END IF
ELSE
    IF ant not carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
            follow trail;
        END IF
        ELSE random move END ELSE
    END IF
    IF ant carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
            follow trail;
        END IF
        ELSE
            ant.direction = nest vector;
        END ELSE
        pheromone cell + 20;
    END IF
END ELSE
END FOR
END WHILE

```

3.2. DIVISIÓN EN SECTORES DE TRABAJO (DST)

Con este algoritmo se pretende eliminar el conocimiento que tienen las hormigas exploradoras sobre la localización del hormiguero. Como se apuntaba en la introducción, existen múltiples sistemas perceptivos por los que las hormigas biológicas se orientan y son capaces de localizarse en el entorno, sin embargo la idea de esta implementación es descubrir hasta qué punto es robusto el sistema sin la necesidad de dicha localización. Esto nos ayudará a simplificar un futuro desarrollo robótico en el que se minimicen los sensores necesarios.

En este caso y antes de que las hormigas salgan del hormiguero, se les asigna un sector en el que realizar su búsqueda. Las hormigas no pueden salirse de dicho sector, por lo que el movimiento permitido de las mismas es el impuesto en el LCH añadiendo el concepto de sector de trabajo, tal y como se puede observar en la figura 6. Se ha dividido el espacio de trabajo en 8 sectores circulares de 90 grados cada uno, solapándose por lo tanto cada sector 45 grados con los contiguos. Los sectores se encuentran implementados por medio del denominado "vector de sector". Para cada posición instantánea de la hormiga, el vector ofrece un sector por el que la hormiga puede navegar.

Las hormigas se encuentran navegando aleatoriamente. Cuando alcanzan la zona de comida su sec-

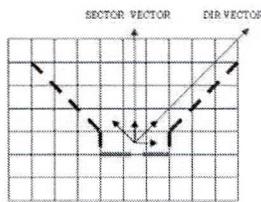


Figura 6: Movimiento permitido en el DST.

tor de trabajo cambia 180 grados y continúa su movimiento depositando feromonas. Por las condiciones del problema si una hormiga ha alcanzado comida viniendo desde el hormiguero con una orientación dada por su sector de trabajo, al cambiar ese sector 180 grados se encontrará orientada hacia el hormiguero.

Cuando la hormiga llega al "fin del mundo" modifica aleatoriamente su sector de trabajo, considerándose en este punto que se encuentra perdida. Una vez modificado dicho sector continúa navegando como si de la primera orden se tratase.

Otro concepto que surge en el DST es la evaporación de feromonas. Puesto que ahora no existe un camino prefijado por las hormigas exploradoras, existen múltiples caminos que se van creando en función de los sectores de trabajo, por lo que es necesario incorporar un sistema de evaporación de feromonas para que los caminos que no se adecuan a los objetivos desaparezcan. Las feromonas se depositarán siguiendo el siguiente esquema:

- Cada unidad de tiempo se evapora una unidad de feromona por celda.
- Cada hormiga, que lleva comida, deposita 15 unidades de feromona si no está siguiendo un rastro de feromona.
- Cada hormiga, que lleva comida, deposita 30 unidades de feromona si se encuentra siguiendo un rastro de feromona.
- Cada hormiga, que no lleva comida, deposita 15 unidades de feromona si se encuentra siguiendo un rastro de feromona.

Dada esta implementación, cabe esperar que según se van sucediendo los experimentos, se empiecen a crear caminos desde el hormiguero hacia la comida y de las zonas de comida hacia los hormigueros. Cuando alguno de estos caminos se unan y exista suficiente concentración de hormigas para mantener las cantidades de feromonas, ese camino será el que tienda a perdurar y atraer al resto de las hormigas. Sin embargo, los resultados obtenidos no

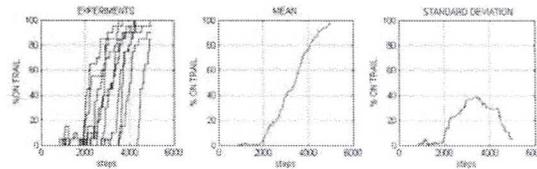


Figura 7: Resultado del DST para una colonia de 20 hormigas.

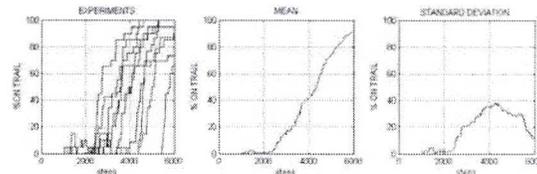


Figura 8: Resultado del DST para una colonia de 40 hormigas.

han sido tan satisfactorios como los esperados, si bien es cierto que en un 50% de los experimentos existe una convergencia hacia un camino uniendo el hormiguero y área de comida, existen experimentos en los que se crean caminos entre comidas, puesto que las ramificaciones de las mismas se han unido antes que las del hormiguero. En la Figura 7 y Figura 8 se pueden observar resultados de los experimentos que ha logrado la convergencia a un camino entre el hormiguero y la comida. Se observa que para estos experimentos la desviación típica del sistema es grande en comparación con las gráficas obtenidas por el otro algoritmo.

Los experimentos se han realizado bajo las siguientes restricciones:

- Número de áreas de comida: 4.
- Distancia de la comida al hormiguero: 50 pasos.
- Número de hormigas: 20 y 40.
- Radio del mundo: 60 celdas.

En la Figura 9 se observa una secuencia de movimiento para un experimento del algoritmo DST para 20 hormigas.

El algoritmo ha sido implementado tal y como se detalla a continuación:

```

SDL Algorithm
FOR each ant in world DO
  ant.position = nest;
  ant.sector = random(0:45:360);
  ant.direction = random(0:45:360);
END FOR

```

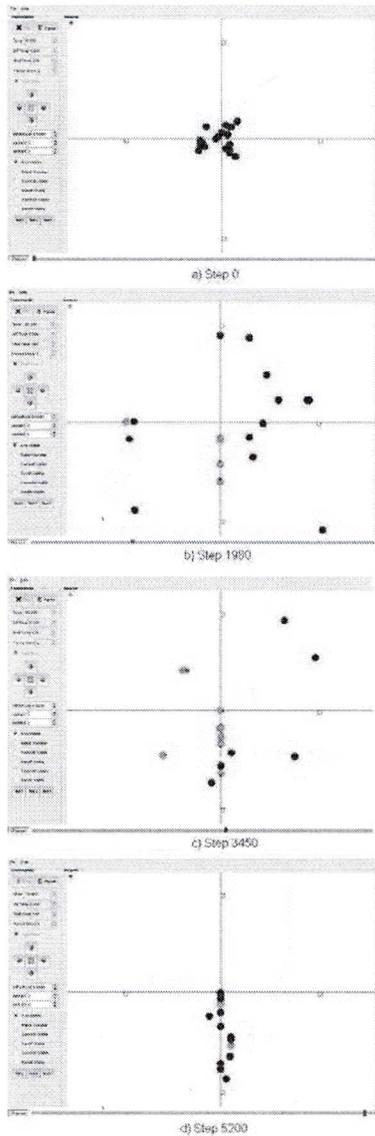


Figura 9: Secuencia del algoritmo DST.

```

/*Main Loop*/
WHILE(1)
  FOR EACH ant in world DO
    IF ant without food and on food area THEN
      pickup food;
      ant.sector + 180°;
      ant.direction = ant.sector;
    END IF
    IF ant with food and on nest THEN
      Leave food;
      ant.sector - 180°;
      IF pheromone trail THEN
        follow trail;
      END IF
      ELSE
        random movement;
      END ELSE
    END IF
    IF ant out of world THEN
      ant.sector = random(0:45:360);
      ant.direction = ant.sector;
    END IF
    ELSE
      IF ant not carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
          follow;
          pheromone cell + 15;
        END IF
        ELSE
          random move;
        END ELSE
      END IF
      IF ant carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
          follow trail;
          pheromone cell + 30;
        END IF
        ELSE random move;
          pheromone cell + 15;
        END ELSE
      END IF
    END ELSE
  END FOR
  FOR EACH cell DO
    pheromone -1;
  END FOR
END WHILE

```

4. CONCLUSIONES

Como se ha observado en los resultados de los experimentos, la necesidad de un sistema de orientación resulta evidente para un correcto funcionamiento de los algoritmos implementados. Para mantener la misma filosofía de sencillez a la hora de la implementación, uno de los posibles sistemas sería usar la posición del Sol [2].

A raíz de los experimentos se ha observado que las condiciones de sedimentación de las feromonas que ofrecen el mayor grado de convergencia en el algoritmo DST van a depender del tamaño de la zona de trabajo, de la situación de la comida y del "fin del mundo", por lo que para poder resolver el problema de convergencia con el mínimo número de sensores se hace necesario formalizar los algoritmos.

Agradecimientos

A D. Iñaki Navarro por el desarrollo del simulador mediante el que ha sido posible comprobar visualmente la emergencia de los distintos comportamientos en los experimentos. A D. Daniel Amor por sus contribuciones correctoras y críticas algorítmicas.

Referencias

- [1] Álvaro Gutiérrez. Phd work: Ant foraging colony based on no implicit knowledge orientation. Technical report, Universidad Politécnica de Madrid. ETSIT, 2006.
- [2] Álvaro Gutiérrez, Félix Monasterio-Huelin, and Luis Magdalena. Ant foraging colony based on sun guidance. (en periodo de aceptación). In *Swarm Robotics. SAB2006*.
- [3] Alexander .N. Banks and Robert B. Srygley. Orientation by magnetic field in leaf cutter ants, *atta colombica* (hymenoptera:formicidae). In *Ethology 109*, pages 835–846, 2003.
- [4] R. Beckers, Jean-Louis Deneubourg, and S Goss. Trails and u-turns in the selection of a path by the ants *lasius niger*. In *Journal of Theoretical Biology 159*, pages 397–415, 1992.
- [5] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity. Oxford University Press, 1999.
- [6] Eric Bonabeau. Marginally stable swarms are flexible and efficient. In *Journal de Physique I*, pages 309–320, 1996.
- [7] Eric Bonabeau and François Cogne. Oscillation-enhanced adaptability in the vicinity of a bifurcation: The example of foraging in ants. In *Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats 4*, pages 537–544, 1996.
- [8] J.-L. Deneubourg, S Aron, S Goss, and Jacques Marie Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. In *Insect Behavior 3*, pages 159–168, 1990.
- [9] S. Goss, S. Aron, Jean-Louis Deneubourg, and Jacques Marie Pasteels. Self-organized shortcuts in the argentine ant. In *Naturwissenschaften 76*, pages 579–581, 1989.
- [10] Roxane Khamsi. Ants use pedometers to find home. Technical report, NewScientist.com, 2006.
- [11] T. Labhart and E. Meyer. Neural mechanism in insect navigation: polarization compass and odometer. In *Curr. Opin. Neurobiol. 12*, pages 707–714, 2002.
- [12] Inaki Navarro. Phd work: State of the art of swarm robotics and formations. Technical report, Universidad Politécnica de Madrid. ET-SII, 2006.
- [13] J. X. Shen, Z.M. Zu, and E. Hanks. Direct homing behavior in the ant *tetramorium caespitum* (formicidae, myrmicinae). In *Animal behaviors 55*, pages 1443–1450, 1998.
- [14] E.F. Vilela, K. Jaffe, and P.E. Howse. Orientation in leaf-cutting ants (formicidae:attini). In *Animal behaviors 35*, pages 1443–1453, 1989.
- [15] Israel A. Wagner, Michael Lindenbaum, and Alfred M. Bruckstein. Distributed covering by ant-robots using evaporating traces. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol. 15, No. 5*, pages 1443–1450, 1999.