

Algoritmos bioinspirados basados en orientación no implícita

Álvaro Gutiérrez Martín, Felix Monasterio-Huelin Maciá y Luis Magdalena Layos

Resumen— El sistema de localización de las hormigas más conocido para la recolección de comida, es el seguimiento de caminos de feromona, aunque para completar la misión, otros sistemas sensoriales trabajan conjuntamente. Algunas de estas percepciones se basan en la sensibilidad a la gravedad, a campos magnéticos, recordatorio de ciertas zonas del entorno, u orientación en función del sol. En el presente trabajo se han implementado tres algoritmos donde se observa la necesidad de orientación geográfica si no existe un conocimiento del entorno o de la geometría de los caminos. Los resultados demuestran que utilizando la orientación del sol, las hormigas pueden localizar el camino de retorno al hormiguero.

Palabras clave— feromonas, comportamientos emergentes, swarm robotics

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las especies de hormigas tienen como principal fuente sensorial la capacidad de rastro 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 [1],[2],[3] y de la evaporación de las sustancias químicas incluidas en las feromonas [4],[5], sin tener en cuenta otro tipo de sensorización.

Diversos trabajos publicados, han mostrado que existen diferentes sistemas sensoriales que entran en juego en los comportamientos de hormigas reales, donde algunos de estos sistemas sensoriales se basan en la orientación por medio del sol [6], sistemas magnéticos y gravitacionales [7],[8] o sistemas de visión [9]. 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].

Aunque se han llevado a cabo trabajos dentro del campo de la robótica, en los que se pretenden realizar coberturas completas de un entorno desconocido basándose en la deposición de sustancias químicas ("marcado del terreno") [11], se desconocen implementaciones robóticas reales que pretendan simular comportamientos similares a las hormigas con un conjunto complejo de sensores. Aún así, los desarrollos en robótica sobre comportamientos bioinspirados se encuentran en pleno auge, donde se puede destacar el proyecto *swarm-bot*, sobre la resolución de tareas cooperativas [12], el proyecto *i-swarm*, sobre la creación de una colonia de 1000 robots [13] y

el proyecto *leurre*, sobre la creación y control de sociedades mixtas compuestas por animales y agentes artificiales [14], que incorporan algoritmos bioinspirados a la resolución de problemas robóticos reales.

En el presente trabajo se desarrollan unos algoritmos para la resolución de localización de comida, donde la problemática del sistema y las hipótesis de partida se detallan en la sección II. Las secciones III, IV y V incluyen las descripciones de los distintos algoritmos. Por último, se comparan los resultados obtenidos y se ofrecen diferentes planteamientos para mejora de los mismos en la sección VI.

II. DESARROLLO

Diferentes experimentos demuestran la necesidad de algún mecanismo añadido a la simple deposición de feromonas para poder completar de manera satisfactoria la tarea de llevar la comida al hormiguero.

La tarea considerada para este trabajo es el estudio de métodos de forraje de un conjunto de robots hormigas simulados. Los robots disponen de una brújula y un mecanismo para ir dejando feromonas y midiendo la concentración de la misma en el entorno. El sistema de feromonas permite a los robots crear y seguir caminos, mientras que la brújula se utiliza como sistema de orientación para la localización del hormiguero.

Para el desarrollo de los experimentos se ha partido del simulador realizado por I. Navarro [15], adecuando el sistema a las necesidades de los experimentos. En dichas simulaciones se han implementado tres tipos de experimentos:

- *Localización Conocida del Hormiguero (LCH)*: En este experimento existen una hormigas denominadas exploradoras que se encargan de localizar las áreas de comida. Una vez descubiertas vuelven al hormiguero (con localización conocida) dejando un rastro de feromonas que servirá de atractor para las trabajadoras.
- *División en Sectores de Trabajo (DST)*: En este experimento no existen hormigas exploradoras, por lo que la vuelta hacia el hormiguero es aleatoria, al igual que la búsqueda de la comida. Se ha añadido la peculiaridad de dividir el espacio de trabajo en sectores circulares para una convergencia más rápida del algoritmo.
- *Orientación Basada en la Posición del Sol (OBPS)*: En este experimento cada hormiga mantiene una localización del hormiguero en función de la posición del sol (por medio de la brújula), de una

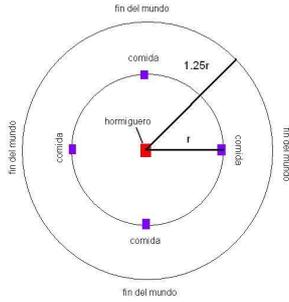


Fig. 1. Espacio de trabajo de las hormigas.

manera similar a la orientación que mantienen algunas especies de hormigas biológicas.

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

- 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 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.

III. 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 grados con respecto a su vector dirección, tal y como se puede apreciar en la Figura 2. Esta restricción en el movimiento del robot evita que se desplace hacia atrás, ofreciendo una visión realista del movimiento de las hormigas; Dadas las posibilidades de movimientos,

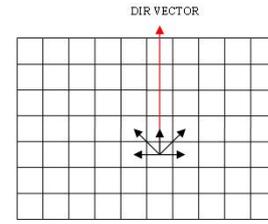


Fig. 2. Movimientos permitidos en el LCH

si se permiten probabilísticamente movimientos circulares tras cuatro unidades de tiempo.

Cuando una hormiga alcanza una zona de comida, es orientada hacia el hormiguero y va depositando 15 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.

Puesto que cualquier otra hormiga exploradora ha podido encontrar otra fuente de comida, existe la posibilidad de que se formen inicialmente más de un camino entre el hormiguero y las áreas de comida. Sin embargo, únicamente el camino de mayor concentración es el que sigue la hormiga, 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, todas las zonas de comida se encuentran a la misma distancia del hormiguero, 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" (se encuentra perdida), 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 ya que, al encontrarse marcado el camino por las hormigas exploradoras, no es necesario implementar dicho comportamiento en el simulador para la convergencia del algoritmo. Por lo tanto, las unidades de feromonas depositadas en cada instante no son relevantes, pero se han mantenido 15 unidades por convenio con el resto de algoritmos. En las siguientes secciones se explicará el por qué de esos valores.

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

Los experimentos se han realizado bajo las siguien-

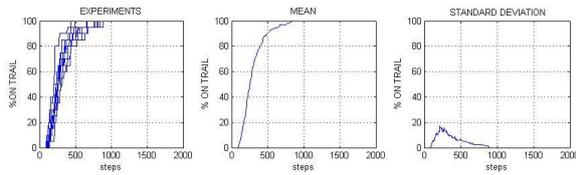


Fig. 3. Resultado del LCH para una colonia de 20 hormigas.

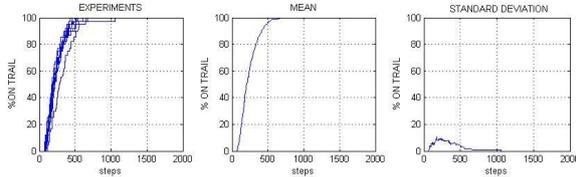


Fig. 4. Resultado del LCH para una colonia de 40 hormigas.

tes restricciones:

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

En la Figura 5 se observa el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia de todos los agentes al camino de comida en función del número de hormigas del experimento, bajo las mismas condiciones de espacio y deposición de feromonas. Se observa que a mayor número de hormigas en el espacio de trabajo, más rápida es la localización de comida y la convergencia del algoritmo.

La Figura 6 muestra 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:

Algoritmo LCH

```
//Se sitúan las hormigas en el hormiguero
//con orientación aleatoria
FOR each ant in world DO
  ant.position = nest
  ant.direction = random(0:45:360)
END FOR
/*Main Loop*/
WHILE(1)
  //Para cada hormiga
  FOR EACH ant in world DO
    //Si se encuentra con comida en zona de
```

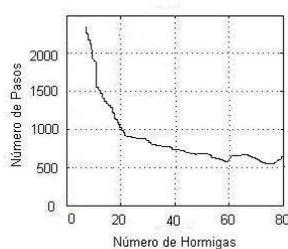
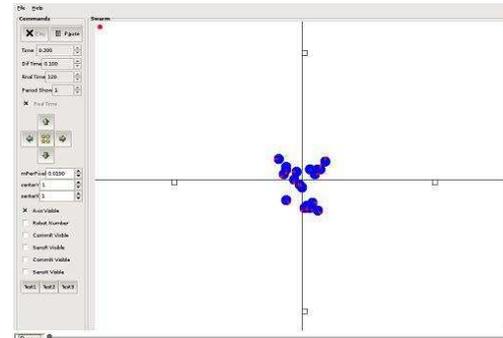
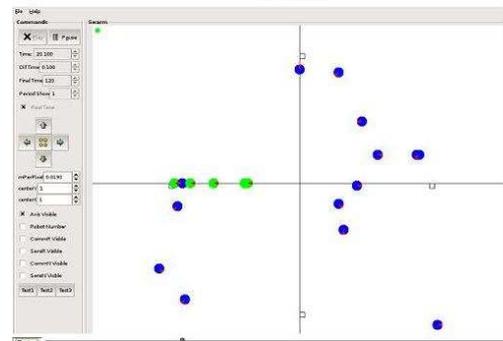


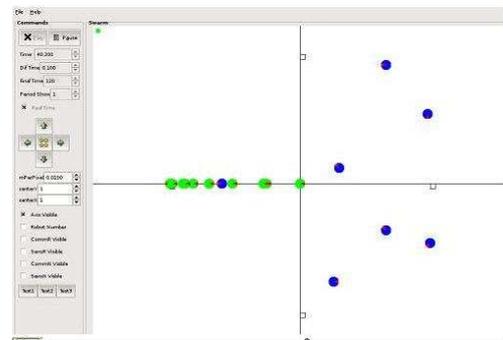
Fig. 5. LCH: Convergencia Vs. número de hormigas.



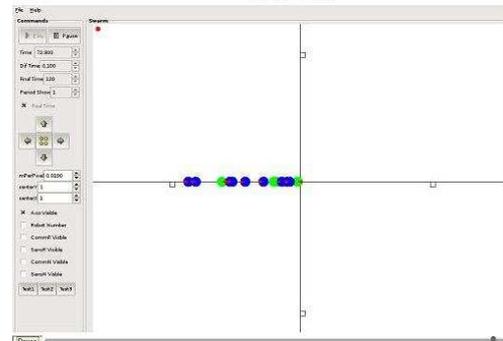
a) Step 0



b) Step 201



c) Step 403



d) Step 728

Fig. 6. Secuencia del algoritmo LCH.

```

//comida, se reorienta hacia el hormiguero
IF ant without food and on food area THEN
  pickup food; ant.direction = nest vector
END IF
//Si con comida en el hormiguero,
//deja la comida y sigue el camino
IF ant with food and on nest THEN
  Leave food; Follow pheromone trail
END IF
//Si "fin del mundo" gira 180 grados
IF ant out of world THEN
  ant.direction + 180°
END IF
ELSE
  //Si no lleva comida sigue el camino de
  //feromona y si no hay rastro random
  IF ant not carrying food THEN
    IF pheromone trail THEN
      follow it
    END IF
    ELSE random move END ELSE
  END IF
  //Si lleva comida sigue camino y deja
  //15 uds. de fer. Si no hay rastro
  //se orienta al hormiguero (exploradora)
  IF ant carrying food THEN
    IF pheromone trail THEN
      follow it
    END IF
    ELSE
      ant.direction = nest vector
    END ELSE
    pheromone cell + 15
  END IF
END ELSE
END FOR
END WHILE

```

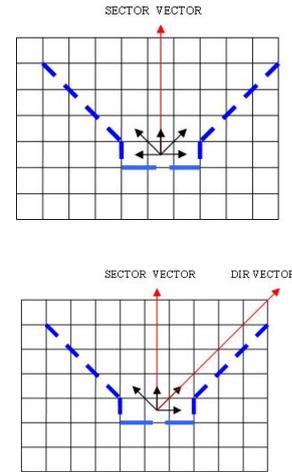


Fig. 7. Movimiento permitido en el DST.

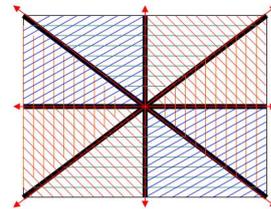


Fig. 8. División de sectores en el DST

IV. 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 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 de trabajo 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 7. 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 (Figura 8). 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 y cuando alcanzan la zona de comida, su sector de trabajo cambia 180 grados y continúa su movimiento depositando feromonas. Por las condiciones del problema planteado, si una hormiga ha alcanzado comida viniendo desde el hormiguero con una orientación dada por su sector de trabajo, al girar 180° 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

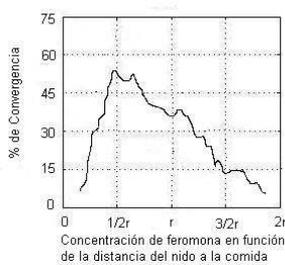


Fig. 9. DST: Convergencia vs. concentración de feromonas

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.

Los valores ofrecidos se deben al tamaño del espacio de trabajo. Una hormiga con comida y siguiendo un rastro de feromonas, es considerada un agente con alta probabilidad de encontrarse en el camino correcto, por lo que la cantidad de feromonas depositadas es mayor al resto de situaciones (cuantificada en la mitad del radio del "fin del mundo"). Hormigas que lleven comida sin disponer de un rastro que seguir, estarán vagando por el entorno, por lo que la cantidad de feromonas a depositar será menor y se ha cuantificado en un cuarto del radio del "fin del mundo", e igual para las hormigas que se encuentren siguiendo un rastro de feromonas sin llevar comida, puesto que el rastro puede estar generado por una hormiga que esté navegando por el entorno. Esta cuantificación de valores tiene una doble explicación: Por un lado se han realizado simulaciones en las que incrementando el número de feromonas depositadas por encima del radio del "fin del mundo", todo el espacio se llena de feromonas sin capacidad de evaporación, y cantidades inferiores a dicho valor ofrecen una convergencia baja o prácticamente nula, debido a la rápida evaporación de las mismas. En la figura 9 se observa la convergencia total de los experimentos en función de la concentración de feromonas depositadas por las hormigas con comida siguiendo rastro de comida, donde r es la distancia entre el hormiguero y las zonas de comida. En el resto de los casos de deposición, se ha considerado la concentración la mitad de la anterior. Por otro lado, y desde una perspectiva robótica, se ofrecen unos estímulos a la hormiga artificial en función de los cuales depositaría más o menos cantidad de feromona, obteniendo de este modo una analogía con el mundo real.

Dada esta implementación, cabe esperar que según se van sucediendo los experimentos, se empiecen a crear caminos desde el hormiguero hacia la comida y

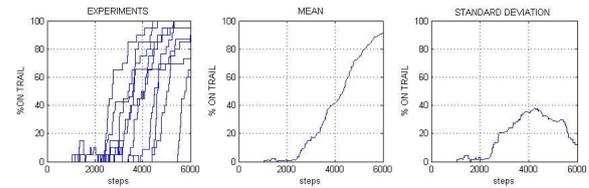


Fig. 10. Resultado del DST para una colonia de 40 hormigas

de las zonas de comida hacia los hormigueros. Cuando dos 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 han sido tan satisfactorios como los esperados, si bien es cierto que un 50% de los experimentos (para condiciones óptimas) mantienen una convergencia total hacia un camino uniendo el hormiguero y área de comida, existen soluciones en las que se crean caminos entre comidas, dado que las ramificaciones de las mismas se han unido antes que las del hormiguero. En la Figura 10 se pueden observar resultados de los experimentos que han logrado la convergencia a un camino entre el hormiguero y la comida para una colonia de 40 hormigas. Se observa que para estos experimentos la desviación típica del sistema es grande en comparación con las gráficas obtenidas por el LCH.

Los experimentos se han realizado bajo las siguientes restricciones:

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

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

```

_____ Algoritmo DST _____

//Se sitúan las hormigas en el hormiguero
//con orientación aleatoria
FOR each ant in world DO
    ant.position = nest
    ant.sector = random(0:45:360)
    ant.direction = random(0:45:360)
END FOR
/*Main Loop*/
WHILE(1)
    //Para cada hormiga
    FOR EACH ant in world DO
        //Si se encuentra con comida, reorientar
        // el sector de trabajo y la dirección
        IF ant without food and on food area THEN
            pickup food; ant.sector + 180°;
            ant.direction = ant.sector
        END IF
        //Si se encuentra con comida en el
        //hormiguero seguir el camino de máxima
        //feromona y reorientar el sector
        IF ant with food and on nest THEN
            Leave food; ant.sector - 180°;
            IF pheromone trail THEN follow END IF
    END FOR
END WHILE

```

```

ELSE random move END ELSE
END IF
//Si en el "fin del mundo" modificar
//el sector aleatoriamente
IF ant out of world THEN
    ant.sector = random(0:45:360)
    ant.direction = ant.sector
END IF
ELSE
    //Si no lleva comida sigue el
    //camino de feromona y si no
    //hay rastro, random
    IF ant not carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
            follow; pheromone cell + 15;
        END IF
        ELSE random move END ELSE
    END IF
    //Si lleva comida incrementa
    // 30 uds. si hay rastro y
    // 15 uds. si no hay rastro
    IF ant carrying food THEN
        IF pheromone trail THEN
            follow; pheromone cell + 30 it
        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

```

V. ORIENTACIÓN BASADA EN LA POSICIÓN DEL SOL (OBPS)

Tras el estudio del DST la necesidad de una orientación en el entorno se hace necesaria. Algunos experimentos llevados a cabo con hormigas reales, demostraron que si un camino marcado con feromonas es destruido, la hormiga queda desorientada. Sin embargo, ella misma se reorienta hacia el hormiguero o la comida, en función del objetivo con el que se encuentre en ese momento [9],[8],[7]. Como el objetivo final del trabajo es construir un conjunto de robots reales, donde diferentes comportamientos puedan emerger con las mínimas necesidades sensoriales, se ha enfocado este último algoritmo hacia la orientación basada en la posición del sol. Un sistema de orientación (como la brújula) se añade a los robots simulados, ofreciendo una serie infinita de caminos paralelos a la solución óptima (desde el hormiguero a la comida).

Incluyendo este nuevo comportamiento al algoritmo DST, las hormigas disponen de un vector de orientación. Se debe remarcar que los experimentos

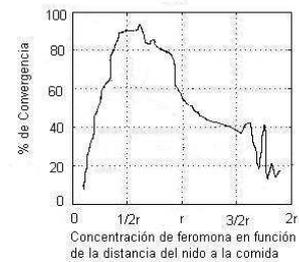


Fig. 11. OBPS: Convergencia vs. concentración de feromona

llevados a cabo implican un sol estático dada la escasa duración de los experimentos. La división de los sectores de trabajo se ha realizado de una manera similar a la del algoritmo DST, 8 sectores de 90° cada uno. Cada hormiga sale del hormiguero con un vector dado del sector de trabajo, y una vez que localizan una zona de comida, cambian su vector teniendo en cuenta la posición que tenía el sol al salir del hormiguero. El camino de vuelta se crea de una manera probabilística, donde 0.9 se le asigna al movimiento frontal y 0.05 a cada desviación de 45° con respecto a la dirección del vector de vuelta.

La deposición de feromonas se actualiza en función de las siguientes reglas:

- 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.

Al igual que en el DST se muestra en la Figura 11 una relación de la cantidad de feromona depositada por cada hormiga al transportar comida siguiendo rastro de feromona, y el tanto por ciento de los experimentos en los que se ha alcanzado la convergencia de todos los agentes en el espacio.

Los experimentos se han realizado bajo las siguientes restricciones:

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

En el caso del OBPS la convergencia del camino entre el hormiguero y la comida se consigue en el 95 % de los experimentos. Se pueden observar resultados en la Figura 12 y Figura 13. En la Figura 14 se muestra la relación entre el número de pasos para que todas la hormigas se encuentren en el camino a la comida y el número de hormigas del experimento, bajo las mismas condiciones del entorno.

En la figura 15 se puede apreciar una secuencia de 40 hormigas mediante el algoritmo OBPS.

El algoritmo implementado en pseudocódigo se detalla a continuación:

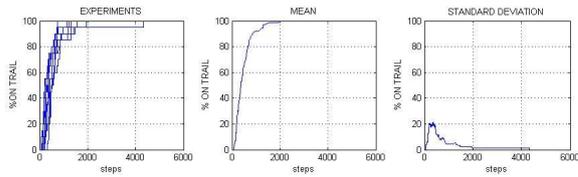


Fig. 12. OBPS para una colonia de 20 hormigas.

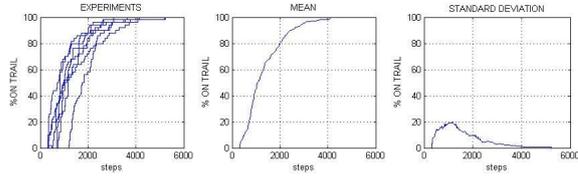


Fig. 13. OBSP para una colonia de 40 hormigas.

Algoritmo OBPS

```

//Se sitúan las hormigas en el hormiguero
//con orientación aleatoria
FOR each ant in world DO
  ant.position = nest
  ant.sector = random(0:45:360)
  ant.direction = random(0:45:360)
  sun = 0° (example)
END FOR
/*Main Loop*/
WHILE(1)
  //Para cada hormiga
  FOR EACH ant in world DO
    //Si está en zona de comida se reorienta
    IF ant without food and on food area THEN
      pickup food; sun orientate;
    END IF
    //Si está con comida en el hormiguero y
    //hay camino síguelo, si no random
    IF ant with food and on nest THEN
      Leave food;
      IF pheromone trail THEN follow END IF
      ELSE random move END ELSE
    END IF
    //Si en el "fin del mundo" modificar
    //el sector aleatoriamente
    IF ant out of world THEN
      ant.sector = random(0:45:360)
      ant.direction = ant.sector
    END IF
  END FOR
END WHILE

```

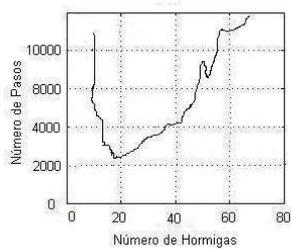
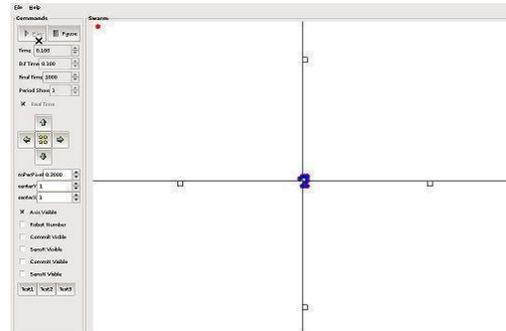
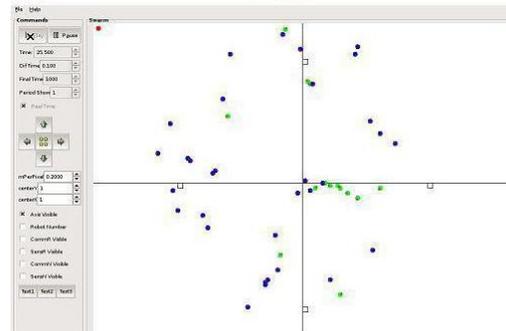


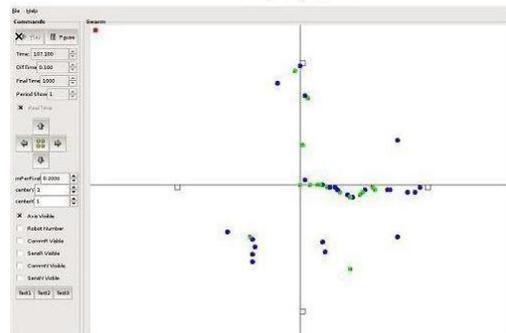
Fig. 14. OBPS: Convergencia vs. número de hormigas.



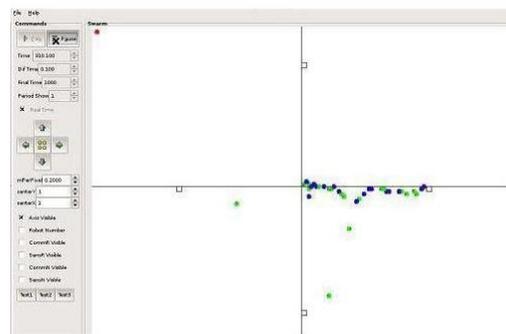
a) Step 0



b) Step 255



c) Step 1071



d) Step 3101

Fig. 15. Secuencia del algoritmo OBPS.

```

ELSE
  //Si no lleva comida sigue el camino de
  //feromona y si no hay rastro random
  IF ant not carrying food THEN
    IF pheromone trail THEN
      follow;
      pheromone cell + 15
    END IF
    ELSE random move END ELSE
  END IF
  //Si lleva comida incrementa
  // 30 uds. si hay rastro y
  // 15 uds si no hay rastro
  IF ant carrying food THEN
    IF pheromone trail THEN
      follow;
      pheromone cell + 30 it
    END IF
    ELSE
      sun orientate;
      probabilistic move;
      pheromone cell + 15
    END ELSE
  END IF
END ELSE
END FOR
FOR EACH cell DO
  pheromone -1
END FOR
END WHILE

```

VI. CONCLUSIONES

Como se ha observado en las tres implementaciones anteriores, las hormigas reales necesitan algo más que un simple camino de feromonas. Las implementaciones realizadas con el algoritmo OBPS han ofrecido buenos resultados en simulaciones cercanas a implementaciones robóticas, pero aún queda trabajo que hacer. No todos los experimentos realizados (sólo un 95 % en las mejores condiciones) han conseguido una convergencia total de la colonia de los robots, por lo que para una convergencia rápida y eficaz la incorporación de nuevos sensores se hace necesaria. Tras los experimentos realizados se pueden extraer diferentes conclusiones. Aumentar el número de hormigas en el mismo espacio de trabajo no implica una convergencia más rápida del algoritmo (en el caso de no existir un conocimiento del entorno), sino que llega un punto en el que empeora la situación debido a la cantidad de feromonas presentes en el terreno, que impide la formación de caminos. Igualmente, la modificación hacia los extremos de la deposición de feromonas por hormiga, impide la formación de caminos; ya sea por la rápida evaporación, en el caso de la reducción del número de feromonas depositadas por hormiga, o por la cobertura total de feromonas en el entorno, debido al aumento del número de feromonas depositadas por hormiga. Por otro lado, para

conseguir un sistema escalable se hace necesario formalizar el problema y desarrollar un algoritmo que tenga en cuenta el desplazamiento del sol durante el desarrollo de la tarea. Recientemente, Harald Wolf y su equipo, en la universidad de Ulm (Alemania), aseguran que aparte de que las hormigas utilicen la posición del sol para localizarse, es necesario mantener una aproximación de la distancia recorrida. [10]

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] J.-L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, and Jacques Marie Pasteels, "The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant," in *Insect Behavior* 3, 1990, pp. 159–168.
- [2] S. Goss, S. Aron, Jean-Louis Deneubourg, and Jacques Marie Pasteels, "Self-organized shortcuts in the Argentine ant," in *Naturwissenschaften* 76, 1989, pp. 579–581.
- [3] 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, 1992, pp. 397–415.
- [4] Eric Bonabeau, "Marginally stable swarms are flexible and efficient," in *Journal de Physique I*, 1996, pp. 309–320.
- [5] 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*, 1996, pp. 537–544.
- [6] T. Labhart and E. Meyer, "Neural mechanism in insect navigation: polarization compass and odometer," in *Curr. Opin. Neurobiol.* 12, 2002, pp. 707–714.
- [7] J. X. Shen, Z.M. Zu, and E. Hankes, "Direct homing behavior in the ant *tetramorium caespitum* (formicidae, myrmicinae)," in *Animal behaviors* 55, 1998, pp. 1443–1450.
- [8] Alexander .N. Banks and Robert B. Srygley, "Orientation by magnetic field in leaf cutter ants, *atta colombica* (hymenoptera:formicidae)," in *Ethology* 109, 2003, pp. 835–846.
- [9] E.F. Vilela, K. Jaffe, and P.E. Howse, "Orientation in leaf-cutting ants (formicidae:attini)," in *Animal behaviors* 35, 1989, pp. 1443–1453.
- [10] Roxane Khamsi, "Ants use pedometers to find home," Tech. Rep., NewScientist.com, 2006.
- [11] 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*, 1999, pp. 1443–1450.
- [12] Marco Dorigo, "Swarm-bots: An experiment in swarm robotics," in *2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2005, pp. 192–200.
- [13] Jörg Swyfried, Marc Szymanski, Natalie Bender, Ramon Estana, Michael Thiel, and Heinz Wörn, "The i-swarm project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation," in *Swarm Robotics*, 2005, pp. 70–83.
- [14] G. Caprari, A.Colot, R. Siegwart, J. Halloy, and J.-L. Deneuborg, "Building mixed societies of animals and robots," in *IEEE Robotics & Automation Magazine* 2004, 2004.
- [15] Inaki Navarro, "Phd work: State of the art of swarm robotics and formations," Tech. Rep., Universidad Politécnica de Madrid. ETSII, 2006.