

Combinando estigmergia y comportamientos de reunion (agrupamiento) para coordinar el comportamiento de los enjambres de drones que realizan busqueda de objetivos

Abstract—Debido a la creciente resistencia, la seguridad y la no-invasividad, pequeños drones pueden ser cada vez mas experimentados en entornos no estructurados. Su potencia moderada de calculo puede ser asimilado en los algoritmos de coordinacion de enjambres, realizando estas tareas en una manera escalable. Para este proposito el mayor desafio es investigar el uso de mecanismos biologicamente inspirados. En este paper la atencion se centra en los aspectos de coordinacion entre los pequeños drones necesarios para realizar la busqueda de objetivos. Se muestra como ese objetivo puede alcanzarse mejor mediante la combinacion de estigmergia y comportamientos de agrupamiento. La estigmergia se produce cuando un dron detecta un objetivo potencial, mediante la liberacion de feromonas digitales en su ubicacion. Multiples depositos feromonas digitales son agregados, incrementandose la intensidad, pero tambien su difusion, se propagan en su entorno, y por ultimo se evaporan, disminuyendo su intensidad en el tiempo. Como una consecuencia la intensidad de las feromonas crea un campo potencial espacio-temporal atractivo para la coordinacion de un enjambre de drones para visitar un objetivo potencial. Agrupamiento (flocking) ocurre cuando drones estan organizados espacialmente en grupos, cuyos miembros tienen aproximadamente la misma partida, y tratan de permanecer en un rango entre ellos, para cada grupo. Ese es un defecto emergente de reglas individuales basadas en alineamiento, separacion y cohesion. En este paper nosotros presentamos un novedoso y totalmente descentralizado modelo para la busqueda de objetivos, y experimentamos de manera empirica usando una plataforma de simulacion multiagente. Las diferentes combinaciones de estrategias son revisadas, describiendo su desempeño en una serie de escenarios sinteticos y del mundo real.

Keywords—*swarm, intelligence, small, drones, stigmergy, flocking, target search.*

I. INTRODUCCION Y MOTIVACION

Pequeños aviones no tripulados son vehículos aéreos no tripulados lo suficientemente pequeños como para ser el hombre-portátil. Los recientes avances en la tecnología de detección fomentar el uso de pequeños aviones no tripulados para la inteligencia militar, reconocimiento, vigilancia, monitoreo de tráfico, localización de incendios forestales, estudios científicos en condiciones peligrosas, en la frontera y el puerto de patrullaje, búsqueda y rescate, el seguimiento de la vida silvestre, y pronto [1]. De hecho, los pequeños aviones no tripulados pueden ser equipados con capacidades de auto-localización y detección, que se utilizará para las tareas de recopilación de información, como la búsqueda de destino o detección del medio ambiente. Más específicamente, en búsqueda de orientación pequeños aviones no tripulados

ofrecen más potencial, ya que puede realizar tareas en entornos altamente inhóspitos, donde el acceso a los seres humanos y grandes aviones no tripulados es limitado o imposible, o en entornos en medianas y grandes aviones no tripulados pueden causar significativamente más daño. Por otra parte, en tareas tales como búsqueda y rescate, para escanear con precisión todos los lugares disponibles en la zona es también una estrategia inadecuada. Un enfoque más eficaz es lograr una "encuesta" rápido de la zona, la identificación de los lugares clave lo más rápido posible, y para investigar mejor sólo lugares clave que proporcionaron alguna evidencia circunstancial. Para completar esta tarea con un solo avión no tripulado, la estructura y la lógica de control debe ser muy costoso en términos de diseño, construcción y mantenimiento. Además, un avión no tripulado único es vulnerable, ya que un solo fallo de hardware o de software puede afectar a todo el sistema, y es difícil de predecir. Por lo tanto, una serie de consideraciones admite el uso de pequeños aviones no tripulados.

Para aprovechar las ventajas de la estrategia anterior, un requisito importante es evitar los enfoques de control centralizados, que con frecuencia conducen a incrementos exponenciales en los requisitos de ancho de banda de comunicación y la complejidad del software [2]. Para resolver los problemas de forma cooperativa, manteniendo la escalabilidad, los diseñadores de aplicaciones están investigando metodologías inteligentes enjambre. La principal fuente de inspiración para los aviones no tripulados enjambre proviene de la observación de los animales sociales, como las hormigas, abejas, aves y peces, que presenta una especie de inteligencia colectiva que parece alcanzar la meta compleja a través de reglas simples y las interacciones locales [3]. Los principales beneficios de aviones no tripulados enjambre son: (i) la robustez, la capacidad de hacer frente a la pérdida de los individuos; (ii) la escalabilidad, debido a la capacidad para llevar a cabo bien con diferente tamaño de grupo; (iii) la flexibilidad, gracias a la capacidad de hacer frente a un amplio espectro de diferentes entornos y tareas. Con este fin, cada individuo del enjambre: (i) actúa con un cierto nivel de autonomía (ii) realiza Sólo detección local y la comunicación; (iii) opera sin control centralizado o conocimiento global, y (iv) coopera para lograr una tarea global. Desde un punto de vista estructural, se supone que cada pequeños aviones no tripulados está dotado de los siguientes equipos: (a) capacidad de comunicación inalámbrica para enviar y recibir información de la estación de tierra; (B) la capacidad de auto-ubicación, por ejemplo, basado en el sistema de posicionamiento global (GPS) y tecnología

inercial, volviendo las coordenadas de su ubicación actual; (C) uno o más tecnología de detección de objetivo, capaz de capturar muestras en el área sobre la que vuela; (D) procesador con capacidad de computación limitada; (E) la evitación de obstáculos capacidad, es decir, la detección y la dirección administrada localmente para evitar que volaba hacia rodea las barreras y los aviones no tripulados.

Un mecanismo fundamental para la coordinación enjambre es marcador a basado en estigmergia[4]. Con estigmergia, los individuos dejan información en el entorno en forma de feromonas, sustancias volátiles difundidos a nivel local y que se encuentren temporalmente para otros individuos que reaccionan y cambian su funcionamiento [5] correctamente. Feromonas simulados se pueden utilizar para grupos de aviones no tripulados para diversas tareas de coordenadas. Suponemos que el mapa de feromonas se construye y mantiene en cada región del espacio de búsqueda, y estarán disponibles en la estación de tierra para aviones no tripulados como una capacidad "cerebro a distancia" [6]. Cuando el sistema de detección de un avión no tripulado determina un objetivo potencial, se ha de permitir la cooperación de su enjambre. De hecho, en caso de un blanco complejo, no es probable que sean múltiples piezas de objetivo dentro de la región circundante. En caso de un blanco simple, que se supone que su distribución no es uniforme, y luego, de nuevo, no es probable que sean otros objetivos simples dentro de la región circundante. Para este propósito, el zumbido libera una cantidad particular de feromona con la ubicación de el objetivo detectada, cuya actúa como un atractivo potencial de aviones no tripulados vecinos difusión. Como efecto, otros aviones no tripulados ayuda en la detección circundante objetivos o pieza de ellos, lo que permite un comportamiento emergente del enjambre que agregan una cantidad considerable de feromona para cada nueva pieza detectada de objetivo. Desde feromona se evaporan con el tiempo y objetivos ya detectados no activan feromona adicional, después de un cierto tiempo de la intensidad de feromonas no puede ser reforzado en una región explorada, y en la práctica desaparece. Para ser atraídos por rastros de feromonas, los zánganos disponibles deben ser organizados espacialmente en un número de enjambres. Cada miembro de un enjambre tiene aproximadamente la misma partida de los otros miembros, y los intentos de permanecer en el rango de entre ellos. Para este fin, las dimensiones estructurales de la feromona deben tener en cuenta la tamaño medio de un enjambre (o viceversa). De lo contrario, una feromona altamente difusa o mal evaporada podría atraer recursos desproporcionados en un solo objetivo, lo que interfiere con el desarrollo progresivo del comportamiento emergente. Por el contrario, una feromona mal difusa o altamente evaporado no pudo ser detectado en absoluto. Flocado es una estrategia para permitir la auto-organización de aviones no tripulados en un número de enjambres. Flocado comportamiento es un efecto emergente de reglas individuales sobre la base de la alineación, la separación y la cohesión [7]. De hecho, con la alineación de los aviones no tripulados gobierna tiende a moverse en la misma dirección que los zánganos cercanas. Con reglas de separación, el zumbido mantiene una distancia mínima capaz de proporcionar el avión no tripulado con flexibilidad cuando se mueve en el enjambre, y para una mejor exploración. Por último, con la cohesión gobierna el zumbido tiende a moverse hacia el enjambre. En nuestro enfoque, estigmergia y flocado son dos

patrones de comportamiento emergentes que deberían trabajar en conjunto con otros patrones de comportamiento básicas del avión no tripulado, como obstáculo y la evitación de límite. El proceso de diseño de una estrategia de combinación es de abajo hacia arriba y consiste en encontrar el ajuste en el nivel micro (a nivel de agente) con el fin de obtener un comportamiento emergente coherente a nivel macro (nivel enjambre o incluso nivel del sistema global de la derecha) [8]. En este trabajo, las diferentes estrategias de combinación son revisados y probados empíricamente con ambos escenarios sintéticos y del mundo real, con obstáculos que tienen formas complejas irregulares. Con este fin, hemos adoptado una plataforma de simulación multiagente con la posibilidad de importar entornos con obstáculos y objetivos incluidos en la muestra de paisajes reales. El documento está estructurado de la siguiente manera. Sección II caracteriza brevemente el trabajo relacionado. En la sección III, el diseño del modelo propuesto está cubierto. Los estudios experimentales se detallan en la Sección IV. Sección V se extraen conclusiones y trabajos futuros.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

El objetivo de esta sección es caracterizar brevemente los principales enfoques y resultados en la literatura sobre los mecanismos de coordinación estigmergético enjambres de pequeños robots para llevar a cabo la búsqueda de destino o tareas similares. Los trabajos publicados en el campo se pueden distinguir en tres categorías: (a) utilizar un físico sustancia, tal como una feromona, que se transmite necesariamente de una manera indirecta entre robots, por medio del medio físico; (B) el uso de una feromona digital, transmitida a través de la comunicación directa entre robots; (C) el uso de una feromona digital, transmitida a través de una La comunicación indirecta entre robots. Esta última es la categoría de nuestro enfoque. En [9] los autores utilizan un enjambre de robots que liberan la sustancia física como una feromona repulsiva, para la exploración medio ambiente. En particular, los robots actúan combinando tres comportamientos básicos, con prioridad decreciente: la pared evitando, coordinación de feromonas, y paseo aleatorio. En realidad, hay varios enfoques en la literatura utilizando feromonas físicas, debido a que no requieren una estructura computacional. Aunque las feromonas reales no son utilizables con el vehículo aéreo, que se pueden simular. Por lo tanto, este tipo de investigación puede ser interesante para modelar digitalmente nuevos tipos de estigmergia. Un ejemplo de coordinación entre estigmergético aviones no tripulados que utilizan la comunicación directa se presentan en [10], en el que el autor se centra en el reconocimiento automático de objetivos. objetivo potencial están marcadas por aviones no tripulados, que también se comunican a la feromona chismeado de aviones no tripulados cercanas, con probabilidad inversamente proporcional a la distancia de la fuente. La propuesta estigmergético esquema emplea también feromona repulsivo, como un voto negativo, cuando un número predefinido de aviones no tripulados identificar el mismo objetivo. Una desventaja de tal sistema es que el ancho de banda requerido entra en una explosión exponencial como la población crece. Por otra parte, para evitar la redundancia en la evaluación de destino cada UAV tiene que mantener en memoria el estado de cada potencial y confirmado objetivo. De esta manera, la comunicación directa en el enjambre debe ser fuertemente limitada [11]. Un esquema de coordinación

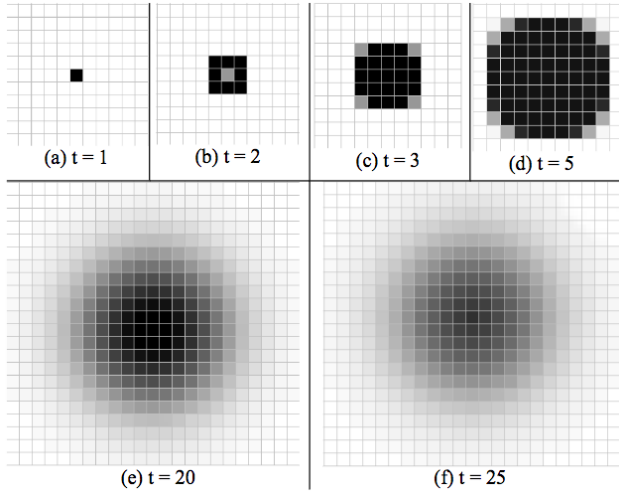


Fig. 1. Escenario basico de feromonas dinamicas: (a) liberacion, (b) difusion principal, (c-d) difusion y evaporacion, (e-f) evaporacion principal.

enjambre con coordinación indirecta se propone en [4]. Aquí la coordinación de un enjambre de vehículos se basa en feromonas digitales mantenidos en un espacio llamado mapa feromona artificial y compuestas por un gráfico arbitraria de agentes lugar, es decir, los nodos de control intermedios. Hay dos clases de agentes que depositar, retirar y leer feromonas, es decir, andadores y avatares. Un agente Walker tiene como objetivo hacer movimientos y decisiones de acción, mientras que los avatares recogen información de ubicación para hacer estimaciones cuando la información del sensor no está disponible. El esquema se ha aplicado a una amplia gama de escenarios, entre los cuales blanco de adquisición. Un importante problema de este enfoque es que la exploración depende del estado inicial de despliegue del enjambre. Por otra parte, este modelo no tiene en cuenta los objetivos complejos, pero sólo objetivos simples y sin relaciones recíprocas.

III. DISEÑO DE ENTORNOS DINAMICOS Y COMPORTAMIENTO DE DRONE

En esta sección se explica la estructura lógica de tanto el entorno como los aviones no tripulados, así como su configuración paramétrica.

A. La estructura del entorno y la dinamica de feromonas

Sin pérdida de generalidad, suponemos que el entorno está limitado a un área específica. Superponemos a esta zona una rejilla consistente de C^2 celdas, cada una identificada por un par (x, y) de coordenadas, con $x, y \in [1, \dots, C]$. El actual tamaño del area y el numero de cuadrados dependen de un específico dominio de aplicacion. La figura 1 muestra algunos escenarios basico del proceso de marcado. Los niveles de intensidad de feromonas estan representados por diferentes gradaciones de grises: la mas oscura es la mas alta en intensidad

Mas esepificamente ver Figura 1: (a) una sola intensidad I de feromona que se libera, (b) en el primer paso, la feromona se difunde principalmente (en movimiento) a las celdas cercanas con una constante de difusion de velocidad de $\delta \int$

$[0, 1]$; (c-d) la feromona se difunde y evapora, por evaporacion, feromona disminuye su intensidad con el tiempo, se rige por la constante de velocidad $\epsilon \in [0, 1]$; (e-f) la feromona es principalmente evaporada. Mas formalmente la intensidad p de feromonas liberado en el instante t en la celda (x, y) es entonces caracterizada por la siguiente dinamica:

$$p_{x,y} = \epsilon \cdot [(1 - \delta) \cdot p_{x,y}(t - 1) + \Delta p_{x,y}(t - 1, t) + d_{x,y}(t - 1, t)] \quad (1)$$

donde $(1 - \delta) \cdot p_{x,y}(t - 1)$ representa la cantidad restante despues de la difusion a las celdas cercanas, $\Delta p_{x,y}(t - 1, t)$ los despositos adicionales hechos en el intervalo $(t - 1, t)$, y $d_{x,y}(t - 1, t)$ la feromona de entrada difundida desde todas las cercanas celdas. Este ultimo puede ser calculado formalmente como:

$$d_{x,y}(t - 1, t) = \frac{\delta}{8} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 p_{x+i,y+j}(t - 1) \quad (2)$$

$(i,j) \neq (0,0)$

desde que cada de los 8 celdas vecinas propaga la porcion δ de su feromona a la celda (x, y) en cada ciclo de actualizacion. El monto total de (1) se multiplicado por ϵ para tener en cuenta la evaporacion.

B. El comportamiento del drone

Básicamente, en cada ciclo de actualización (en lo sucesivo denominada señal), el comportamiento del drone se estructura en una lógica de tres capas, donde cada capa implementa un comportamiento básico: vuelo aleatorio (exploración) es el comportamiento correspondiente a la capa más baja de-prioridad, mientras que la feromona basada en coordinación (explotación) es la capa media, y esquivamiento de los objetos/límites y la feromona libera comportamientos que se realizan por el nivel de arquitectura de mayor prioridad. Fig. 2 muestra una representación general del comportamiento del drone, utilizando un diagrama de actividad UML. Aquí, una caja de esquinas redondeadas representa una actividad (un procedimiento), una caja rectangular representa un objeto de datos de entrada / salida (un parámetro), flechas continuas y discontinuas representan los flujos de control y de datos, respectivamente. El diagrama también se estructura en tres carriles horizontales, que representan los componentes físicos o lógicos.

Más precisamente, cada unidad de período del drone realiza en paralelo: (a) la detección de blancos, en cuyo caso se libera feromonas; (b) los objetos y de detección de límite. Si se detecta un objeto cercano (es decir, obstáculo o drone), los puntos de drone siguen hacia una dirección libre. Si se encuentra una dirección libre, se mueve hacia adelante. De lo contrario, si no hay objetos cercanos detectados, los drone tratan de detectar feromonas y, si se detecta, apunta hacia la intensidad máxima de la misma (el drone es capaz de detectar las feromonas en la detección de feromonas a π distancia). Con otras palabras, si no se detecta la feromona, el drone intenta detectar drones que lo rodean con el fin de apuntar hacia el grupo. Por último, si no hay aviones circundantes, realiza un giro al azar y seguir adelante.

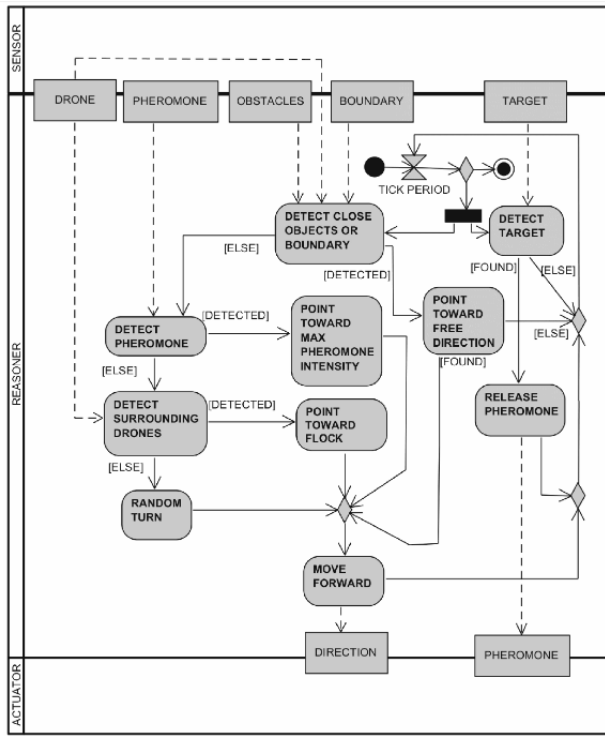


Fig. 2. Representacion general del comportamiento del drone

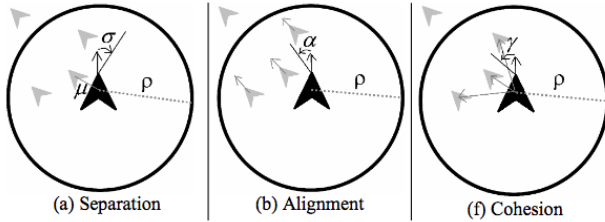


Fig. 3. Vision del radio de agrupacion y otros parametros en comportamiento de agrupamiento

En el comportamiento de agrupamiento, el drone toma en cuenta únicamente los drones dentro de un radio de visibilidad de agrupamiento (ρ). Fig. 3 muestra los principales parametros de flockado (agrupamiento). Mas especificamente la Fig. 3a representa el comportamiento de separacion: drones muy cerca de otros tiene que separarse para un mejor exploracion; por tanto, si un drone detecta a otro drone cerca de la "distancia de movilidad de agrupacion" (μ), este gira en un angulo σ (angulo de separacion de agrupamiento).

Fig. 3b muestra el comportamiento de alineacion: el drone calcula la direccion promedio de los drones en el radio de visibilidad de la agrupacion y se convierte en un angulo α (distancia de alineacion de agrupacion) para conformar su direccion a la direccion del agrupamiento. Fig. 3c ilustra el comportamiento de cohesion: drones aislados no sienten la feromona digital, y esto impide la cooperacion; por lo tanto, drones tienden a permanecer en las proximidades; por esta razon, el drone calcula el baricentro de los drones en el radio de visibilidad de agrupacion y gira en un angulo γ (angulo de cohesion de agrupacion) hacia el baricentro.

TABLE I. PARAMETROS ESTRUCTURALES Y DE COMPORTAMIENTO

Parameter	Description (unit measure)	Section	Range	Set v.
v	Drone horizontal speed (m/s)	III.B	(0,15)	1
θ	Drone max rand-fly turn angle ($^{\circ}$)	III.B	(0,180)	90
o	Drone object sensing distance (m)	III.B	(0, 5)	5
ρ	Flock visibility radius (m)	III.B	[0, 50]	10
μ	Flock mobility distance (m)	III.B	[0,5]	3
σ	Flock separation angle ($^{\circ}$)	III.B	(0,180)	20
α	Flock alignment angle ($^{\circ}$)	III.B	(0,180)	8
γ	Flock cohesion angle ($^{\circ}$)	III.B	(0,180)	5
I	Pheromone release intensity	III.A	(0, ∞)	50K
δ	Pheromone diffusion rate (%)	III.A	[0,1]	0.90
ε	Pheromone evaporation rate (%)	III.A	[0,1]	0.95
π	Pheromone sensing distance (m)	III.B	(0, ∞)	1

Por medio de un comportamiento reactivo, un drone es capaz de detectar y evitar los obstáculos cercanos, drones, y limites (objetos) a la distancia o (distancia de detección de objetos) en su trayectoria. Aquí se ha modelado la velocidad horizontal del drone (v), cuando se mueve hacia adelante. Si un objeto se encuentra en su trayectoria de colisión, el drone encuentra una trayectoria libre o deja de moverse. Se elige al azar a girar a la izquierda o hacia la derecha para evitar el obstáculo. A continuación, gira en un grado por uno y comprueba la nueva trayectoria. Si el drone encuentra una trayectoria libre, antes girar en 180 grados su movimiento, si no se detiene por una señal. Vale la pena señalar que un drone vuela a 1 metro de altura desde el suelo, y luego consideramos edificios y árboles como obstáculos para ser modelados.

Actualmente los limites de la superficie total de navegacion se pueden calcular usando la posicion del drone y comparandolo con el perimetro. Esto puede ser hecho por la estacion de tierra, la cual simula "una pared" con el fin de no perder el drone. Finalmente, cuando el drone esta en el comportamiento basico (volar al azar), se gira al azar por su angulo menor que θ (maximo angulo de giro de vuelo al azar).

Para mayor comodidad del lector, la tabla I resume los principales parametros estructurales y de comportamiento del modelo, con su alcance y su valor establecido.

IV. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

El modelo propuesto se ha implementado en "NetLogo", una plataforma líder para la simulación de la inteligencia de enjambre. Para evaluar la eficacia del enfoque propuesto, hemos evaluado el rendimiento de el modelo de los tres comportamientos básicos: vuelo aleatorio ("R de random"), el comportamiento estigmergético ("S de stigmergia"), el comportamiento estigmergético y de agrupacion (flocking) ("S + F"). Para cada experimento, 10 ensayos se han llevado a cabo, mediante el uso como un indicador de rendimiento del tiempo necesario para detectar el 95% de los objetivos en el escenario. Hemos probado el modelo en 5 escenarios diferentes. También se determinó que las muestras de indicadores de rendimiento resultantes están bien modelados por una distribución normal, usando una prueba de normalidad gráfica. Por lo tanto, se calcularon los intervalos de confianza del 95%.

TABLE II. RESULTADOS NUMERICOS

Scenario	N° of targets / clusters	Type / n° of obstacles	Drones	Completion time (ticks)	
Field	50 / 5	Trees: 0 Build: 0	80	R	1756 ± 178
				S	802 ± 160
				S+F	689 ± 142
Forest	20 / 1	Trees: 400 Building: 0	80	R	2378 ± 512
				S	744 ± 194
				S+F	677 ± 68
Urban	110 / 2	Tree: 0 Building: 7	40	R	1448 ± 106
				S	861 ± 148
				S+F	800 ± 73
Rural Mines	28 / 28	Tree: 281 Building: 3	200	R	724 ± 83
				S	694 ± 88
				S+F	666 ± 68
Urban Mines	40 / 40	Trees: 54 Building: 28	25	R	354 ± 25
				S	455 ± 60
				S+F	415 ± 44

La Tabla II resume las características y los resultados de cada escenario, en la forma " \pm de un intervalo de confianza".

El escenario sintético llamado "Field" consta de 5 objetivos esparcidos por la zona, con cerca de 10 objetivos por grupo. No hay obstáculos. Fig. 4a representa la configuración inicial: 80 drones en total dispuestos en 4 enjambres están representados por las formas triangulares, y se sitúan en las antipodas de la zona, mientras que los objetivos están representados por grupo de puntos. Fig. 4b muestra la disposición espacial de los enjambres con forma y tamaño diferente. Finalmente Fig. 4c representa 3 formaciones estigmetricas en tres diferentes objetivos. En la parte inferior derecha se puede observar que una formación estigmergetica atrajo a un enjambre de drones. Los resultados de la Tabla II confirman que la combinación de estigmergia y comportamientos de agrupación aceleran el proceso de búsqueda de objetivos en el escenario Field.

El escenario Forest (bosque) (Fig. 5a) representa una reconstrucción sintética de objetivos de difusión en un soporte de madera. Aquí, 20 objetivos y 400 árboles están representados por puntos negros y grises, respectivamente. 80 drones en total dispuestos en 4 enjambres, se han colocado inicialmente en las antipodas de la zona. Una vez más, la combinación de estigmergia y agrupación sensible (flocking) mejora tanto la media y el intervalo de confianza.

El escenario Urbano (Fig. 5b) es caracterizado por dos cluster de 110 objetivos en total colocados en 2 lados de 7 construcciones en total. 40 drones organizados en 4 enjambres, son puestos en las antipodas del área, sin árboles en absoluto. También para este escenario, el rendimiento de la Tabla II confirma la tendencia positiva del enfoque que combina estigmergia y agrupamiento (flocking).

Las Minas del Campo (Fig. 5c-d) y Minas Urbana (Fig. 5e-f) se derivan de escenarios real y ejemplos del mundo de las zonas cercanas a Sarajevo, en Bosnia-Herzegovina, con objetos de minas terrestres, seleccionado de mapas disponibles al público. Recientemente, algunos autores propusieron en realidad el uso de pequeños drones para detectar las minas terrestres [12]. En ambos casos, drones se han colocado inicialmente en los límites de la zona. Con respecto al mapa de los primeros tres escenarios, cuya área es de 200 metros cuadrados, en el

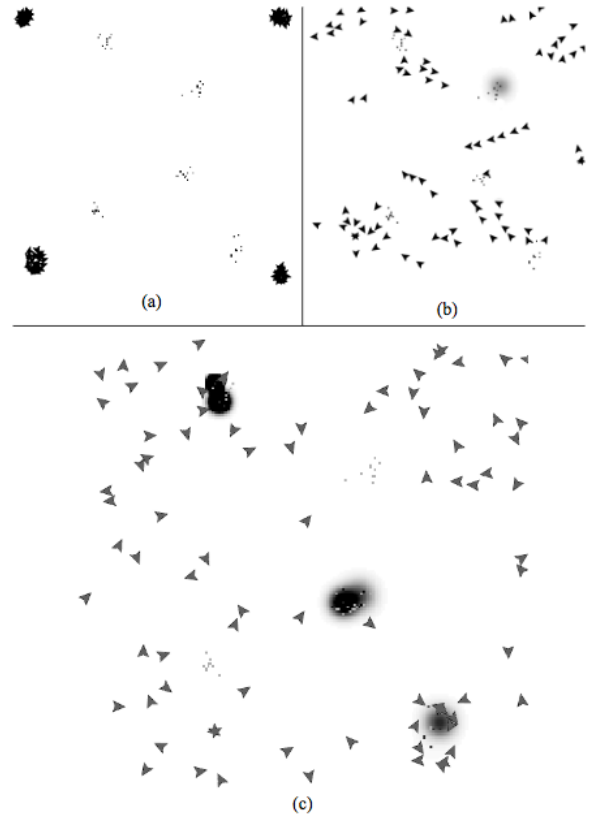


Fig. 4. Algunas capturas del escenario: Field: (a) estado inicial, (b) flocks (agrupación), (c) tres formaciones estigmetricas

último dos escenarios de la zona es de 400 metros cuadrados. En el escenario de Minas rurales, se confirma el efecto positivo de estigmergia y reunión (agrupamiento flocking). Por lo tanto, se puede observar en la Tabla II que adopte estigmergia y, a continuación, estigmergia con Flock, mejora el rendimiento en todos los escenarios, excepto para el escenario de Minas urbanas, cuya tendencia es la contraria. Este resultado podría atribuirse al hecho de que el mapa Minas urbana tiene un muy complejo diseño de obstáculos, que hace que la navegación agrupada difícil y difícil la estrategia de coordinación. Vale la pena señalar que todos los escenarios se han procesado mediante el uso de un propósito de parametrización general. De hecho, una parametrización en (ad) la inicialización adapta a los tipos de escenario que puede producir resultados diferentes.

Para investigar mejor la dinámica de la búsqueda objetivo, Fig. 6a-c muestra la tasa de completación en función del tiempo, para el escenario urbano.

A continuación, se muestra la evolución de cada ensayo de un experimento. Es evidente que estigmergia introduce una mejora significativa sobre Random Fly (vuelo random), a partir de alrededor de un tercio de la cobertura objetivo, mientras que la combinación de estigmergia y agrupación (flocking) supera estigmergia especialmente en términos de variabilidad entre los ensayos.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este pape, presentamos una nueva estrategia de enjambre, basada en estigmergia y comportamiento de agrupa-

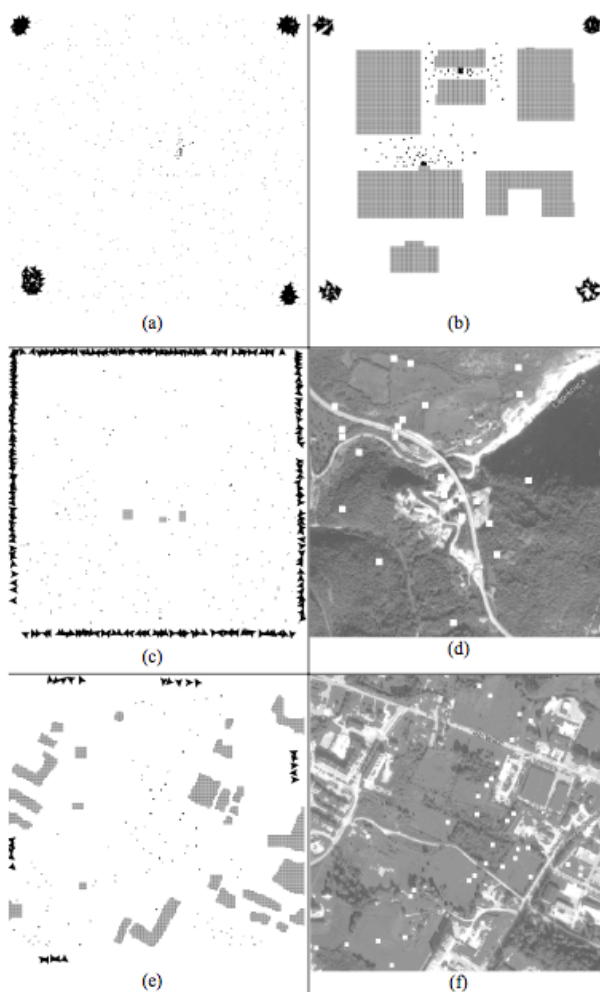


Fig. 5. Modelos de 2 sintéticos y 2 escenarios reales: (a) Bosque, (b) Urbano, (c-d) Minas Rurales, (e-f) Minas Urbanas

ción (flocking behaviors). El enfoque utiliza estigmergia para atraer drones en las áreas con objetivos potenciales y emplea agrupación (flocking) para organizar drones en enjambres. Los resultados simulados en escenarios sintéticos y reales han demostrado los beneficios de estigmergia y agrupación (flocking). El mecanismo general se puede activar mejor si los parámetros estructurales están sintonizados correctamente para el escenario dado. La determinación de estos parámetros correctos no es una tarea sencilla ya que las diferentes áreas tienen diferentes características. Por lo tanto, una afinación apropiada para adaptar los parámetros a la área de búsqueda específica es deseable hacer que la búsqueda sea más eficaz. Con este fin, utilizar una estrategia de optimización de parámetros se considera una actividad de investigación clave para los futuros trabajos.

REFERENCES

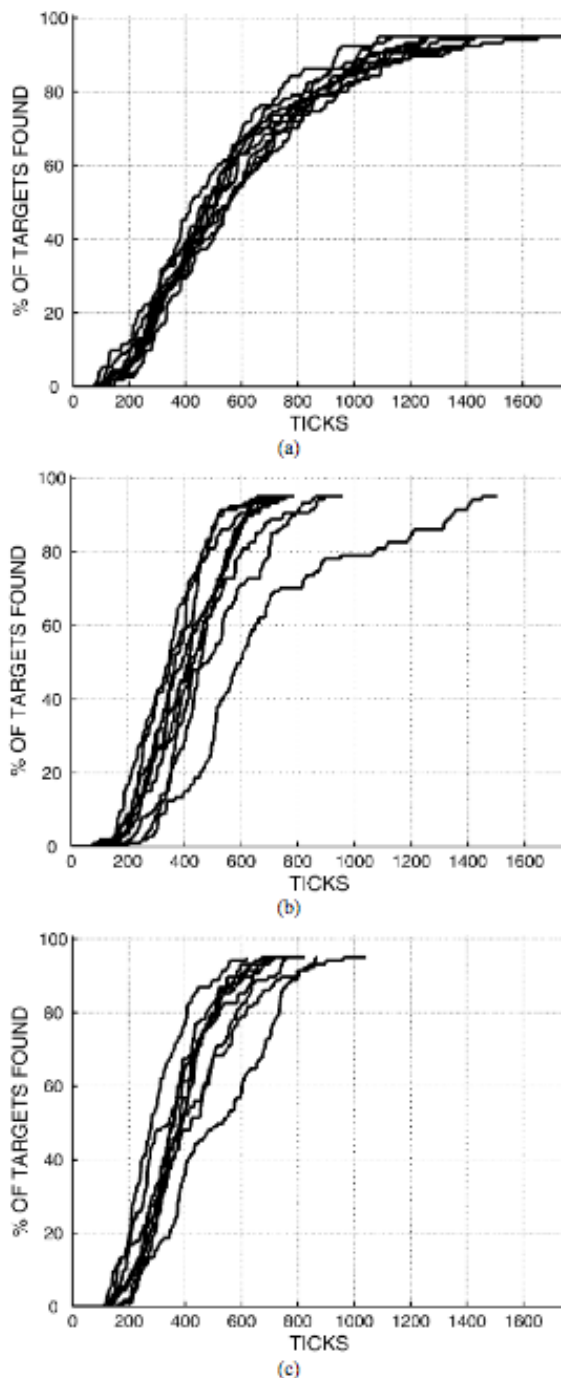


Fig. 6. Tasa de completación en función del tiempo para el escenario Urbano: (a) Vuelo random, (b) Estigmergia, (c) Estigmergia + Agrupación (flocking)