Robótica de Enjambre

Arquitecturas Robóticas Inteligentes

06 de Marzo de 2014



Guión

- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry



- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry



- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

¿Qué es la robótica colectiva?



 La robótica se considera colectiva cuando dos o más robots se encuentran desarrollando una tarea conjunta

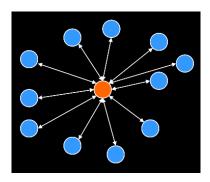


- Detrás de esta simple definición se esconde un problema más complejo
 - ¿Cómo se organiza cada robot?
 - ¿Cual debe ser su función dentro del grupo?



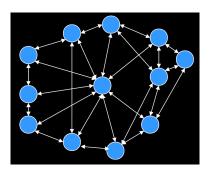
¿Organización centralizada?

 En un sistema centralizado, un agente (el líder) se encarga de planificar la tarea global y ordenar diferentes funciones al resto del equipo



¿Organización descentralizada?

 En un sistema descentralizado, cada agente decide su propio comportamiento de una forma autónoma acorde con la información que obtiene localmente



¿Cómo diseñar un sistema descentralizado?



¿Cómo diseñar un sistema descentralizado?

Inspirarnos en la naturaleza

¿Cómo diseñar un sistema descentralizado?

Inspirarnos en la naturaleza





- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

¿Qué es la inteligencia de enjambre?

 Cualquier intento de diseñar algoritmos o soluciones a problemas distribuidos inspirados en el comportamiento coletivo de colonias de insectos sociales y otras sociedades animales

Bonabeau, Dorigo & Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. 1999

¿Por qué insectos?

- 10¹⁸ insectos en el mundo
- 2 % son sociales
 - Todas las hormigas
 - Todas las termitas
 - Algunas abejas
 - Algunas avispas
- 50 % de los insectos sociales son hormigas
- Peso de la hormigas = Peso de la humanidad



Auto-Organización

¿Cómo se coordinan?

Auto-organización

- Emerge un comportamiento a nivel global como resultado de interacciones entre componentes de nivel inferior
- Las reglas que especifican las interacciones en el nivel inferior se basan exclusivamente en información local, sin que exista la referencia a un patrón global
- Es una propiedad emergente en vez de una propiedad impuesta por un agente externo

Auto-Organización

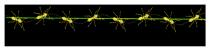
- Múltiples interacciones
- Aleatoriedad
- Realimentación positiva
 - Reclutamiento
- Realimentación negativa
 - Limitar el número de trabajadores



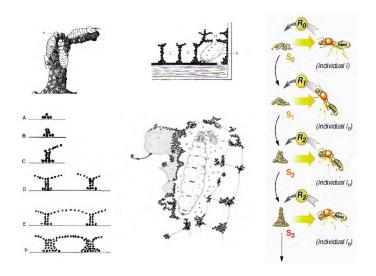
¿Hay Comunicación?

- La comunicación es necesaria
- 2 tipos:
 - Directa: Antenas, trofalaxis, contacto visual, substancias químicas, etc
 - Indirecta: Comunicación a través del entorno
 - Estigmergia





Estigmergia



Estigmergia Artificial

¿Estigmergia artificial?

 Comunicación indirecta a través de modificaciones en el entorno que son accesibles a nivel local

Dorigo & Di Caro. Ant Colony Optimization: A New Meta-Heuristic. 1999

¿Qué es la inteligencia de enjambre?

- La inteligencia de enjambre es una técnica de la inteligencia artificial basado en el estudio de comportamientos colectivos en sistemas descentralizados y auto-organizados
- En la inteligencia de enjambre los individuos son simples e interaccionan localmente entre ellos y con el entorno.
- Las interacciones locales producen comportamientos globales emergentes
- Encontramos comportamientos similares en la naturaleza: colonias de hormigas, movimiento de pájaros, bancos de peces, pastoreo de animales, etc

¿Qué es la inteligencia de enjambre?

- La inteligencia de enjambre estudia grupos de muchos individuos que:
 - son relativamente simples (comparados con la tarea que quieren resolver)
 - se coordinan mediante un control distribuido
 - sensan localmente el entorno
 - se pueden comunicar directamente sólo con sus vecinos
 - se pueden comunicar indirectamente a través del entorno
 - tienen un comportamiento estocástico
 - explotan mecanismos de realimentación positiva y negativa

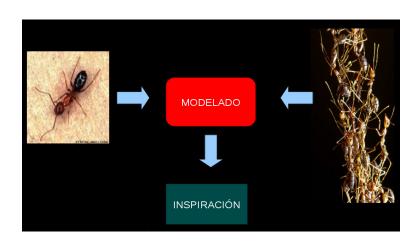
- Distinguir entre:
 - Inteligencia de enjambre científica
 - Inteligencia de enjambre ingenieril

- Distinguir entre:
 - Inteligencia de enjambre científica se referie al estudio de enjambres naturales

- Distinguir entre:
 - Inteligencia de enjambre ingenieril se refiere al diseño e implementación de enjambres artificiales

 La inteligencia de enjambre ingenieril se inspira en los estudios de la Inteligencia de enjambre científica para resolver problemas colectivos

Inspiración vs. Imitación



Inspiración vs. Imitación





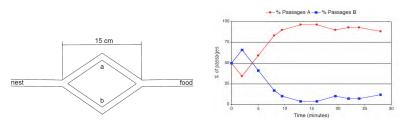
Inspiración vs. Imitación



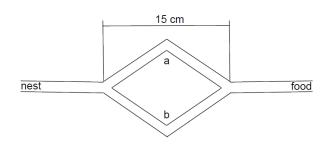




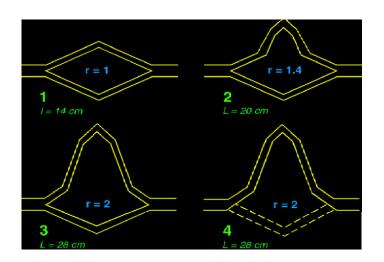


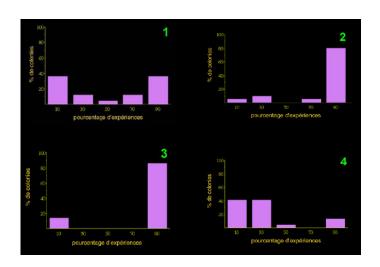


Goss et. al. Self-Organized Shortcuts in the Argentine Ant. 1989



$$Pa = \frac{(k+Ai)^n}{(k+Ai)^n + (k+Bi)^n} = 1 - Pb$$





- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

Robótica de Enjambre

¿Qué es la robótica de enjambre?

- Es la aplicación de los principios de la inteligencia de enjambre a la robótica colectiva
- Es una parte de la robótica colectiva
 - relevante para el control y coordinación de un gran número de robots
 - en el que los robots son relativamente simples e incapaces de realizar las tareas en solitario
 - donde los robots tienen sólo información local y capacidades sensoriales limitadas

¿Para qué?

¿Para qué?

Paralelismo

Diferentes robots pueden realizar diferentes tareas al mismo tiempo

Tolerancia a fallos

- Robots simples son menos propensos a fallos
- Cuando uno falla otro ocupa su lugar
- No hay un único punto de fallo

Coste

Robots simples son más baratos que los complejos

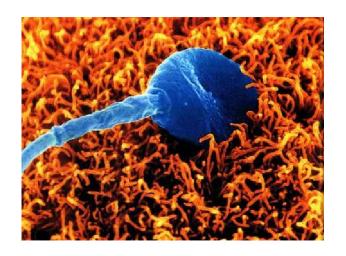
Escalabilidad

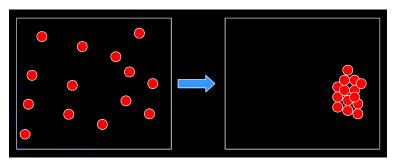
Más robots → más tareas

¿Cómo?

¿Cómo?

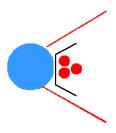
- Hardware redundante
 - Sistemas multi-agente
- Sistemas de control descentralizados
 - Control distribuido y auto-organizado
- Sistemas de comunicación descentralizados
 - Comunicación local, distribuida y situada



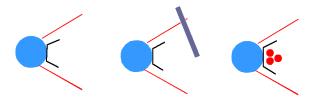


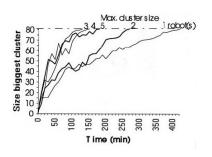
Beckers, Holland & Deneubourg. From local actions to global tasks: stigmergy and collective robotics. 1994

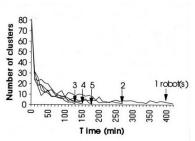
- Los robots disponen de:
 - Tracción diferencial
 - 2 sensores de infrarrojos
 - Una pinza con un sensor de contacto activo a partir de 3 elementos



- 3 comportamientos:
 - Navegar en línea recta
 - Esquivar obstáculos
 - Si la pinza detecta algo (3 objetos), marcha atrás y giro







¿Es esto robótica colectiva? ¿Es esto robótica de enjambre?

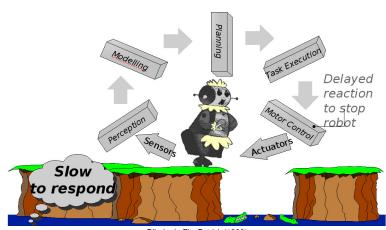
¿Es esto robótica colectiva? ¿Es esto robótica de enjambre?

- Robótica Colectiva ~
- ullet Robótica Cooperativa \simeq

¿Es esto robótica colectiva? ¿Es esto robótica de enjambre?

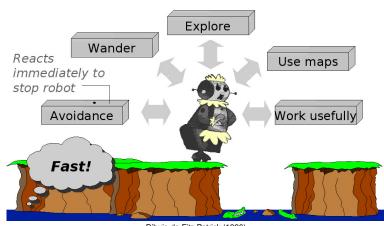
- Robótica Colectiva ≃
- ullet Robótica Cooperativa \simeq
- Robótica de enjambre

Robótica basada en el conocimiento



Dibujo de Fitz Patrick (1996)

Robótica basada en el comportamiento



Dibujo de Fitz Patrick (1996)

Enfoques

- Coordinación
- Cooperación
- Deliberación



- Agregación
- Dispersión
- Seguimiento de caminos
- Transporte colectivo
- Decisión colectiva

- Auto-organización
- Auto-reparación
- Auto-ensamblado
- Auto-reproducción

- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

Coordinación

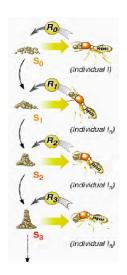
 La organización apropiada en espacio y tiempo de las tareas requeridas para complementar el comportamiento colectivo deseado

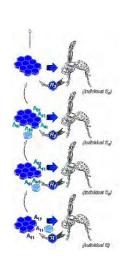


Construcción de nidos



Movimiento colectivo



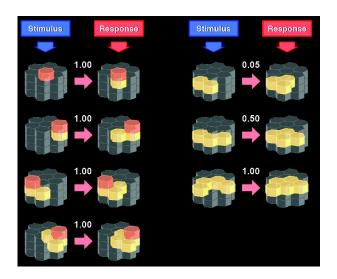


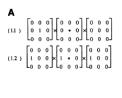
- Sea $C = C_1, C_2, ..., C_n$ un conjunto de estímulos locales
- Sea $S = S_1, S_2, ..., S_m$ un conjunto de etapas de construcción
- Cada etapa S_i está caracterizada por un conjunto de estímulos $(C(S_i))$
 - $U_iC(S_i) = C$
 - $C(S_i) \cap C(S_j) = \emptyset$; $\forall i \neq j$

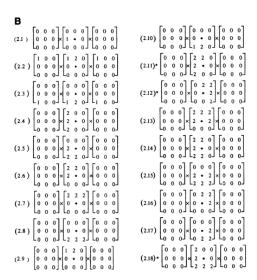
Theraulaz &Bonabeau. Coordination in Distributed Building. 1995

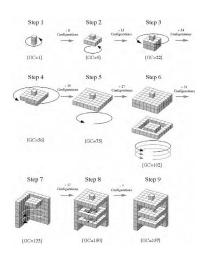


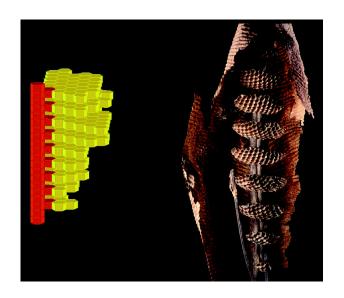


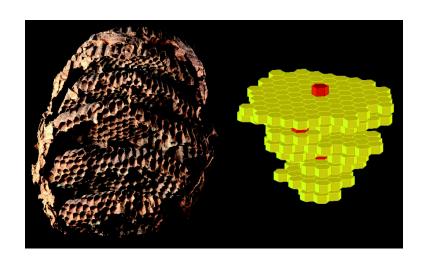












 Una compañía estadounidense hace uso de la configuración local para un diseño multi-robot involucrado dentro de un proyecto espacial





Dynamic Concepts, Inc

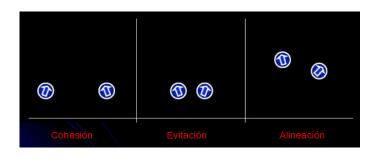
- Transporte colectivo
- Exploración

- Contacto
- Sin contacto









Reynolds, Flocks, Herds and Schools: A distributed Behavioral Model, 1987





- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

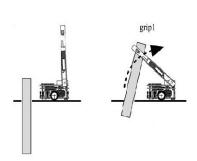


Cooperación

 La organización para conseguir una tarea que no pudiera ser conseguida por un único individuo





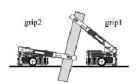


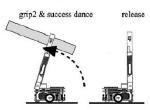


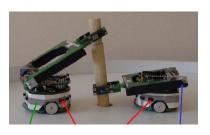
Ijspeert

et al, Collaboration through the explotation of local Interations in autonomous collective robotics:

The stick pulling experiment, 2001









Campo et. al, Negotiation of Goal Direction for Cooperative Transport, 2006

Reparación

Reparación

- ¿Cómo saber que un miembro del grupo tiene un problema?
- ¿Cómo repararlo?
- Inspiración en las luciérnagas
- Cada robot emite un flash como si fuese un latido del corazón
- Si un robot se extropea deja de latirle el corazón

Christensen et. al, Fault Detection in Autonomous Robots Based on Fault Injection and Learning, 2008

Christensen et. al, From Fireflies to Fault Tolerant Swarms of Robots, 2009

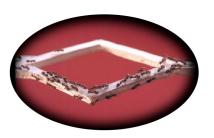
Reparación



- Introducciór
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

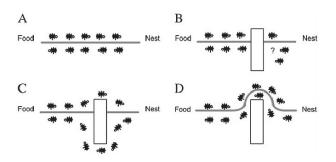
Deliberación

• La decisión colectiva de una opción entre otras del entorno





Foraging



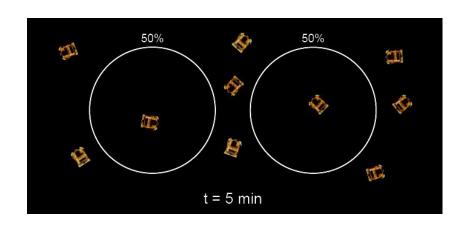
Garnier et. al, Alice in Pheromone Land: An Experimental Setup for the Study of Ant-like Robots, 2007

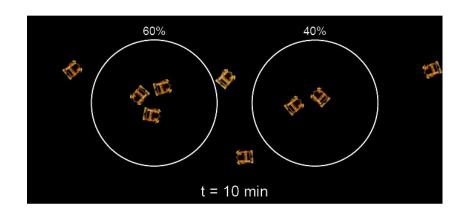
- Agregación de cucarachas
 - En un entorno homogéneo las cucarachas se juntan en cualquier sitio.
 - Preferiblemente en zonas oscuras
 - Si hay varias zonas, se juntan en un sola

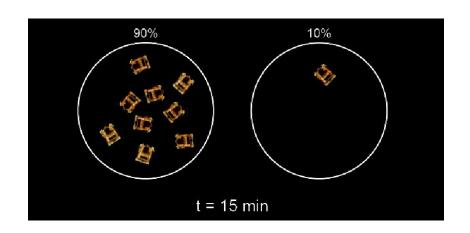




Jeanson et. al. Self-organized aggregation in cockroaches. 2005







Formación de cadenas

Formación de cadenas

- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry

Comunicación situada

e-Puck Range and Bearing

- Tarjeta de 3.5 cm de radio
- Microcontrolador dedicado
- 12 módulos de emisión/recepción infrarroja
 - 1 diodo emisor → Emisión
 - 1 diodo modulado receptor → Recepción de datos
 - 1 photodiodo infrarrojo → Intensidad
- Distribuidos uniformente ightarrow 30 $^\circ$





Gutierrez et al. An Open Localisation and Local Communication Embodied Sensor. 2008

e-Puck Range and Bearing

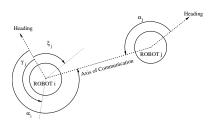
- Autonomía:
 - Consumo reducido: 121 mW max
 - Rango de transmisión controlado por software (0 cm 80 cm)
- Velocidad:
 - Frame rate: 150 msg/s → 3600 bytes/s
- Fiabilidad:
 - Ångulo: 4.32 ° media, 12.32 ° max
 - Distancia: 2.39 cm media, 6.87 cm max

Orientación



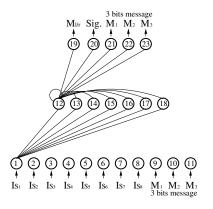
Orientación - Ejem 1

- Los robots no tienen un sistema global de referencia
- Paso 1:
 - Robot i transmite un broadcast
 - Robot j sabe que hay un robot en α_j
 - Robot j emite α_i
- Paso 2:
 - Robot *i* procesa el dato: $\gamma_j = \alpha_j$
 - Calcula la dirección apuntada por j: $\xi_j = \gamma_j + \alpha_i \pi$



Gutierrez et al, Open E-puck Range & Bearing Miniaturized Board for Local Communication in Swarm Robotics, 2009

Orientación - Ejem 2



$$\tau_{i}\dot{y_{i}} = \begin{cases} -y_{i} + gI_{S_{i}}; & i \in [1, 8] \\ -y_{i} + gM_{j}; & i \in [9, 11], j \in [1, 3] \\ -y_{i} + \sum_{j=1}^{k} \omega_{ji}\sigma(y_{j} + \beta_{j}); & i \in [12, 23] \end{cases}$$
(1)
with $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$

$$F_e = \frac{2}{T} \sum_{t=\frac{T}{2}}^{T} \left(1 - \frac{\pi - H_t}{\pi} \right);$$
 (2)

$$H_t = min\left(|\theta_t^{rc} - \theta_t^{cr}|\right), \text{ with } \theta_t^{rc}, \theta_t^{cr} \in [0^\circ, 360^\circ];$$

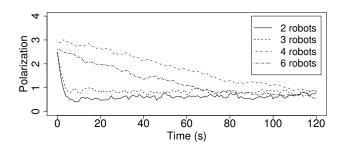
Gutierrez et al, Evolution of Neuro-Controllers for Robots Alignment using Local Communication, 2009



Orientación - Ejem 2

Evaluación: Polarización

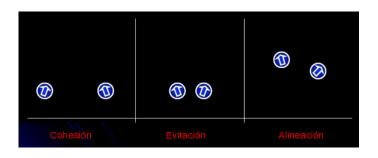
- $\theta^{rc} < \theta^{ri}, \forall i \in G \setminus \{c\}$
- ullet $heta_{ann}$ orientación relativa entre el robot r y c
- $P(G) = \sum_{i \in G} \theta_{ann}(i)$



Orientación

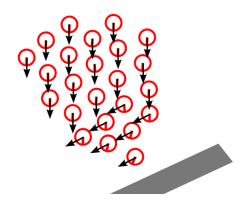
- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry



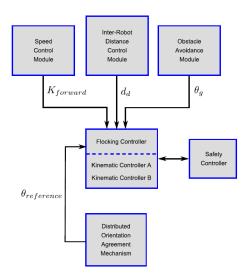


Reynolds. Flocks, Herds and Schools: A distributed Behavioral Model. 1987





Navarro. Collective Movement in Robotic Swarms (PhD Thesis). 2010
Navarro & Matía. A Framework for Collective Movement of Mobile Robots Based on Distributed Decisions. In Press

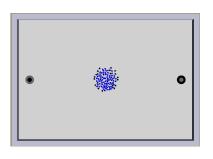


- Introducción
 - Robótica Colectiva
 - Inteligencia de Enjambre
- Robótica de Enjambre: Introducción
 - Coordinación
 - Cooperación
 - Deliberación
- Robótica de enjambre: A fondo
 - Flocking
 - Social Odometry



Experimentos

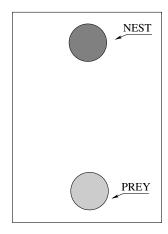
- Experimento de localización de comida
- Comunicación vs. No Comunicación
- SGIKF and SGIFF
- Controladores basados en el comportamiento
- Robots reales y simulados

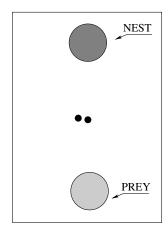


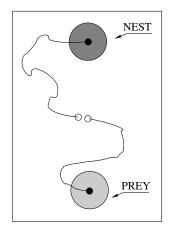


- 2 experimentos diferentes
 - Un único objetivo: Correción colectiva de la estimación
 - Múltiples objetivos: Decisión colectiva

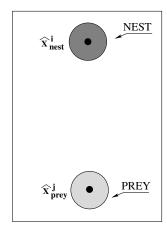




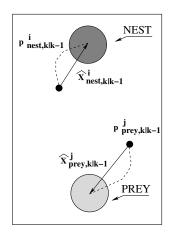




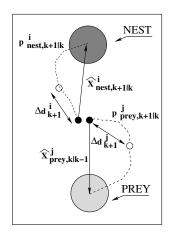




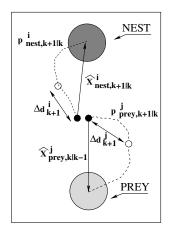




• La estimación *A posteriori* iguala a la estimación *A priori*



- La estimación A posteriori iguala a la estimación A priori
- Actualización del movimiento: $p_{k+1|k}^{nest,i} = p_{k|k}^{nest,i} + \Delta d_{k+1}^{i}$

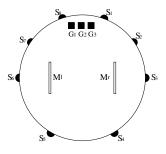


- La estimación A posteriori iguala a la estimación A priori
- Actualización del movimiento: $p_{k+1|k}^{nest,i} = p_{k|k}^{nest,i} + \Delta d_{k+1}^{i}$
- Comunicación:
 - Ningún robot conoce la ubicación:
 - No hay intercambio de información
 - Un robot conoce la ubicación:
 - El robot desinformado adopta la estimación del robot informado
 - Los dos robots conocen la ubicación:
 - Los robots utilizan los filtros de la Odometría Social

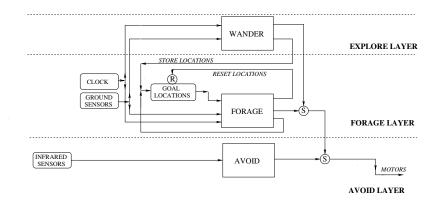


Controladores

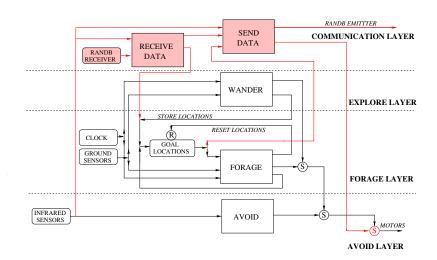
- Arquitectura basada en el comportamiento
- Arquitectura Subsunción
- Entradas y Salidas:
 - Reloj: 100 ms
 - Sensores infrarrojos: 8 sensores de proximidad
 - Sensores de suelo: 3 sensores de color
 - RANDB emisor y receptor:
 La tarjeta e-RandB
 - Motores: Tracción diferencial



Controlador sin comunicación



Controlador con comunicación



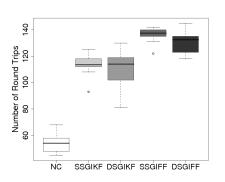
Experimento con 1 Objetivo

- Experimentos con robots reales y simulados
- 30 repeticiones por cada experimento
- Métricas:
 - Reclutamiento: El tiempo para que todos los robots hayan encontrado al menos 1 vez el hormiguero y la comida
 - Recolección: El número de idas y vueltas entre el hormiguero y la comida para la duración del experimento
 - Estabilidad: El número de robots que no se consideran perdidos durante el experimento

	ES1	ES2	ES3
Dimensiones (m ²)	1.2 x 1.7	3.0 x 4.25	6 x 8.5
Radio del area de inicio (m)	0.2	0.5	0.5
Radio del hormiguero y la comida (m)	0.1	0.1	0.1
Número de robots	10	50	100
Duración del experimento (s)	1800	7200	7200

Experimento con 1 Objetivo

Robots reales Recolección



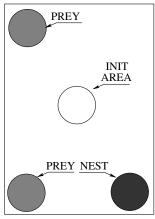
• Óptima $\beta = 10^{-2}$



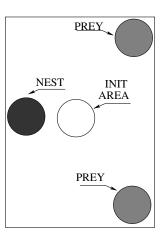




Experimento con 2 Objetivos



Experimento asimétrico



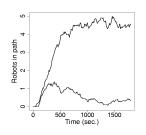
Experimetno simétrico

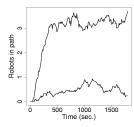
Experimento con 2 Objetivos

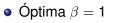
 Filtro del Fermi Social Inducido Generalizado Doble(DSGIFF):
 Los robots usan las ecuaciones del SGIFF para fusionar la información relativa al las dos áreas

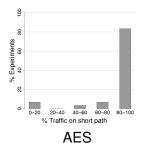
	Arena 1	Arena 2	Arena 3
Dimensiones (m ²)	1.2 x 1.7	3.0 x 4.25	6 x 8.5
Número de robots	10	50	100
Duración del experimento (s)	1800	7200	7200
Radio del área de inicio (m)	0.2	0.5	0.5
Radio del hormiguero y la comida (m)	0.1	0.1	0.1

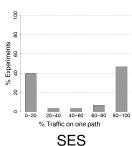
Experimento con 2 Objetivos













GRACIAS!!



GRACIAS!!

