

COMPUTACIÓN BIOLÓGICA

Pedro Isasi¹

¹Departamento de Informática
Universidad Carlos III de Madrid
Avda. de la Universidad, 30. 28911 Leganés (Madrid). Spain
email: isasi@ia.uc3m.es

Presentación

TEMARIO

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ALGORITMOS GENÉTICOS
- 3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA
- 4 COMPUTACIÓN CON INSPIRACIÓN BIOLÓGICA
 - Coevolución
 - Enjambres de Partículas
 - Optimización mediante Colonias de Hormigas
 - Sistema de hormigas para el problema del viajante
- 5 BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN

TEMARIO

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ALGORITMOS GENÉTICOS
- 3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA
- 4 **COMPUTACIÓN CON INSPIRACIÓN BIOLÓGICA**
 - Coevolución
 - **Enjambres de Partículas**
 - Optimización mediante Colonias de Hormigas
 - Sistema de hormigas para el problema del viajante
- 5 BILOGÍA Y COMPUTACIÓN

TEMARIO

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ALGORITMOS GENÉTICOS
- 3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA
- 4 COMPUTACIÓN CON INSPIRACIÓN BIOLÓGICA
 - Coevolución
 - Enjambres de Partículas
 - Optimización mediante Colonias de Hormigas
 - Sistema de hormigas para el problema del viajante
- 5 BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN

HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS

- Las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto desde una fuente de comida hasta el nido sin utilizar el sentido de la vista
- ¿Qué ocurre si se encuentran con un obstáculo?



RASTRO DE FEROMONAS

- Cada hormiga emite una cantidad de feromona a medida que camina
- La sustancia emitida puede ser detectada por otras hormigas:
 - La hormiga elige el camino proporcional a la feromona del mismo
 - La feromona del camino se disipa con el tiempo, y si no se vuelve a generar desaparece
 - Los caminos poco frecuentados casi no tienen posibilidad de ser utilizados, a menos que se encuentre comida y se repita el proceso
- Este comportamiento elemental explica como las hormigas son capaces de seguir caminos cortos hacia lugares relativamente alejados
- También son capaces de adaptarse a cambios producidos en el entorno, por ejemplo son capaces de encontrar un nuevo camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

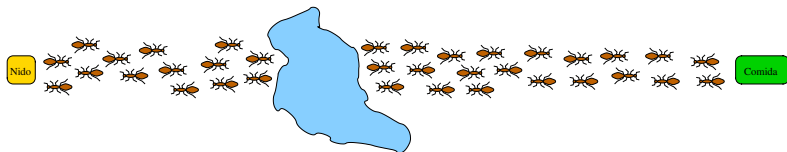
RASTRO DE FEROMONAS

- Cuando aparece el obstáculo, aquellas hormigas que lo tienen delante no pueden seguir el rastro de feromona
- Tienen que elegir entre ir hacia la derecha o hacia la izquierda
- Es de esperar que la mitad de las hormigas vayan hacia la derecha y la otra mitad hacia la izquierda
- Lo mismo pasará en el otro lado del obstáculo
- Aquellas hormigas que elijan el, por casualidad, el camino más corto, podrán reconstruir más rápidamente el rastro de feromona perdido
- Las hormigas de este camino empiecen a emitir su feromona con anterioridad, y por lo tanto la probabilidad posterior de elegir este camino se incrementa
- En poco tiempo este mecanismo hace que todas las hormigas elijan el camino más corto

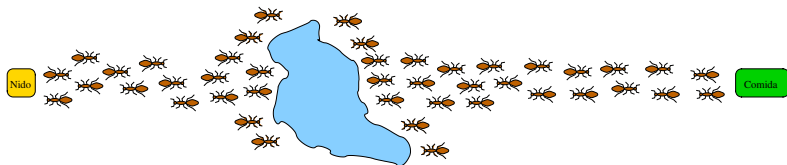
HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



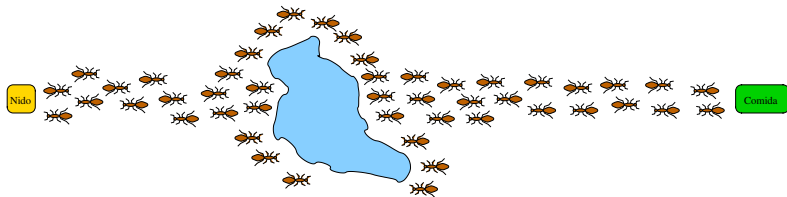
HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



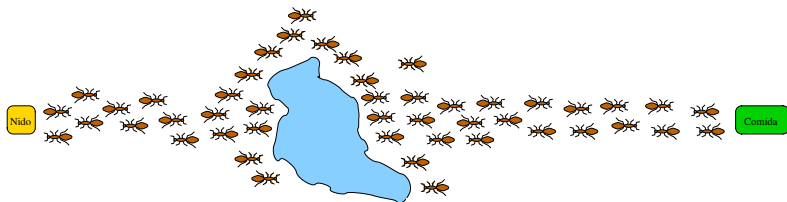
HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



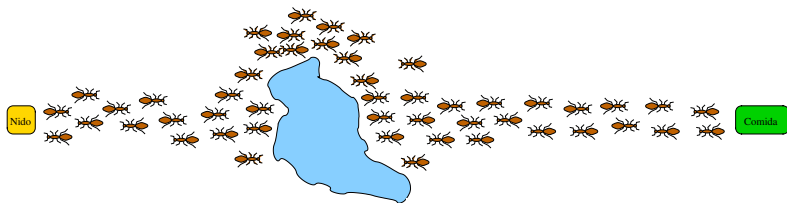
HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



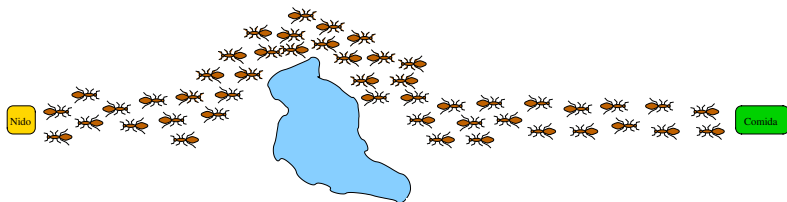
HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



HORMIGAS COMO OPTIMIZADORES DE CAMINOS



PROPIEDAD EMERGENTE

- Encontrar el camino más corto es una propiedad emergente de la interacción entre la forma del obstáculo, y el comportamiento distribuido de las hormigas
- Aunque todas las hormigas se mueven a la misma velocidad y depositan feromona en la misma cantidad, cuesta menos rodear objetos por el lado más corto
- El camino corto acumula más cantidad de feromona y más probabilidad de ser elegido por las hormigas
- Es la predilección de las hormigas por caminos con mayor cantidad de feromona lo que hace que la acumulación sea cada vez mayor en un proceso de retroalimentación
- ¿Esta propiedad puede ser utilizada computacionalmente para resolver el problema del viajante?

ACO METAHEURÍSTICA

- Una colonia de hormigas artificiales cooperan para encontrar buenas soluciones a problemas de optimización combinatoria
- La clave fundamental es la cooperación y el tamaño de la colonia (grande)
- La aparición de buenas soluciones es una propiedad emergente de la interacción cooperativa entre las hormigas
- La mayoría de las ideas ACO provienen de las hormigas reales:
 - Uso de una colonia de individuos que cooperan
 - Un camino de feromonas como vía de comunicación
 - Una secuencia de movimientos locales para encontrar el camino más corto
 - Una política de decisión estocástica utilizando información local

SEMEJANZAS I

- Uso de una colonia de individuos que cooperan
 - Una hormiga puede encontrar una solución, en las reales el camino entre nido y comida
 - Soluciones de alta calidad requieren de la cooperación entre un conjunto grande de hormigas
- Un camino de feromonas como vía de comunicación
 - Tanto hormigas reales como artificiales cambian su entorno. Las reales depositan sustancias químicas, las artificiales cambian información numérica del estado que visitan.
 - Otras hormigas leen esa información al visitar ese estado. Esta es la única vía de comunicación entre hormigas artificiales (explotación)
 - Se incluye un mecanismo de disipación de la información, para que la hormiga olvide la historia pasada y pueda buscar nuevas soluciones (exploración)

SEMEJANZAS II

- Una secuencia de movimientos locales para encontrar el camino más corto
 - Las hormigas no saltan, se desplazan por el terreno localmente
 - Las hormigas artificiales se desplazan a estados contiguos.
Contigüidad \Rightarrow Depende del problema
- Una política de decisión estocástica utilizando información local
 - Las hormigas se mueven mediante una política local probabilística
 - Las artificiales también. Utilizan información local en espacio (información a priori de adyacencia de estados, equivalente a la estructura del terreno)
 - Y en tiempo \Rightarrow cantidad de feromona de los estados

DIFERENCIAS

- Viven en un mundo discreto
- Tienen un estado interno para memorizar acciones pasadas
- La emisión de feromona puede ser global, en todo el camino al mismo tiempo
- Se les puede dotar de mecanismos dependientes del dominio, como backtraking, optimización local, información no local o elitismo

SISTEMA ACO

- Cada hormiga construye una solución, a partir de un estado inicial, de acuerdo a un determinado criterio \Rightarrow aproximación constructiva incremental
- La hormiga recoge información del problema y de su propio rendimiento, para cambiar la representación del problema
- Todas las hormigas utilizan el mismo espacio, cambios producidos por una hormiga afectan a las demás \Rightarrow único método de comunicación
- Una solución se expresa mediante un camino a través de los estados del problema

DINÁMICA DE LAS HORMIGAS

- Cada hormiga se mueve hacia un estado vecino y así va construyendo una solución
- Los movimientos se realizan mediante una política estocástica local:
 - Mediante la memoria de la hormiga \Rightarrow información acerca del pasado de la hormiga
 - Mediante la cantidad de feromona del tramo
- La memoria es fundamental para la construcción de soluciones viables \Rightarrow lista tabú
- La feromona codifica el conocimiento acumulado por todas las hormigas desde el inicio del proceso

FEROMONA

- La feromona es utilizada a modo de memoria a largo término que influye en las decisiones de las hormigas
- Cuándo y cuánta feromona depositar depende del problema
 - Paso a paso.- A medida que se va construyendo el camino
 - Retardado.- Después de que se ha construido todo el camino
- Se deposita feromona proporcionalmete a la calidad de la solución

AUTOCATÁLISIS

más hormigas visitan un camino \Rightarrow más feromona tiene \Rightarrow más interesante es ese camino para todas

FEROMONA

- La feromona es utilizada a modo de memoria a largo término que influye en las decisiones de las hormigas
- Cuándo y cuánta feromona depositar depende del problema
 - Paso a paso.- A medida que se va construyendo el camino
 - Retardado.- Después de que se ha construido todo el camino
- Se deposita feromona proporcionalmente a la calidad de la solución

AUTOCATÁLISIS

más hormigas visitan un camino \Rightarrow más feromona tiene \Rightarrow más interesante es ese camino para todas

FEROMONA

- La feromona es utilizada a modo de memoria a largo término que influye en las decisiones de las hormigas
- Cuándo y cuánta feromona depositar depende del problema
 - Paso a paso.- A medida que se va construyendo el camino
 - Retardado.- Después de que se ha construido todo el camino
- Se deposita feromona proporcionalmete a la calidad de la solución

AUTOCATÁLISIS

más hormigas visitan un camino \Rightarrow más feromona tiene \Rightarrow más interesante es ese camino para todas

FEROMONA

- La feromona es utilizada a modo de memoria a largo término que influye en las decisiones de las hormigas
- Cuándo y cuánta feromona depositar depende del problema
 - Paso a paso.- A medida que se va construyendo el camino
 - Retardado.- Después de que se ha construido todo el camino
- Se deposita feromona proporcionalmente a la calidad de la solución

AUTOCATÁLISIS

más hormigas visitan un camino \Rightarrow más feromona tiene \Rightarrow más interesante es ese camino para todas

TABLA DE DECISIÓN

- Cada nodo tiene una tabla de decisión para guiar a las hormigas
- La tabla de decisión tiene una entrada para cada uno de los nodos vecinos del nodo en cuestión
- La entrada es:
 - Inversamente proporcional al coste del tramo
 - Directamente proporcional a la feromona del tramo

$$a_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}]^{\alpha} [\eta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i} [\tau_{il}]^{\alpha} [\eta_{il}(t)]^{\beta}}$$

$\tau_{ij} \Rightarrow$ feromona del tramo ij , $\eta_{ij} = \frac{1}{c_{ij}} \Rightarrow$ beneficio del tramo ij ,
 $\alpha, \beta \Rightarrow$ peso de la feromona y del coste respectivamente

TABLA DE DECISIÓN

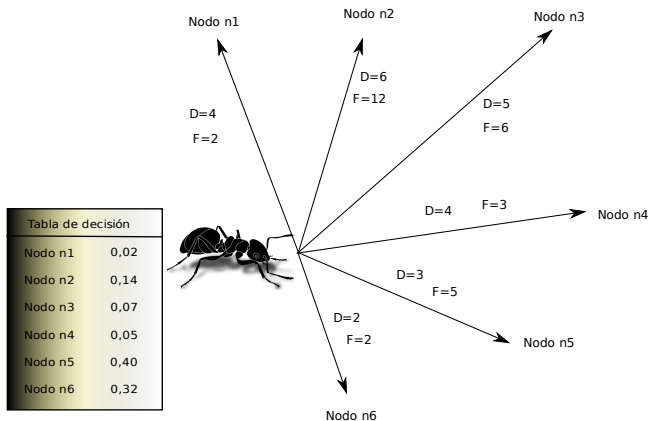


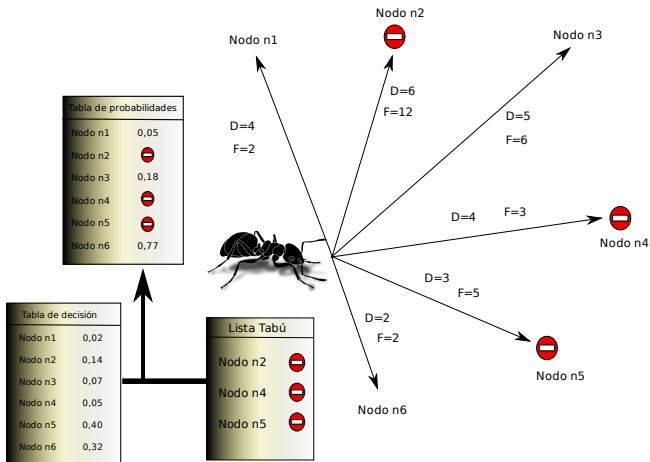
TABLA DE PROBABILIDADES

- Cada hormiga construye, para cada nodo, una tabla de probabilidades, a medida que los visita
- La tabla de probabilidades se construye a partir de la tabla de decisión del nodo, y de la lista tabú de la hormiga
- Se normalizan los valores de decisión de los nodos destino que no estén en la lista tabú:

$$v_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i^k} a_{il}(t)}$$

- La tabla de probabilidades se utiliza para decidir a qué nodo se desplazará la hormiga

TABLA DE PROBABILIDADES



PARÁMETROS

- α y β controlan la influencia de la feromona y el coste
- α alto \Rightarrow las hormigas prefieren tramos con feromona
- β alto \Rightarrow las hormigas prefieren tramos poco costosos
- Si se eligen tramos por feromona se generan ciclos subóptimos
- Si se eligen tramos por coste se converge a soluciones triviales \Rightarrow métodos greedy
- Hay que buscar un compromiso entre los dos

DEPÓSITO DE FEROMONA

- Las hormigas deben dejar rastro de feromona en los tramos
- Cada hormiga k deja una cantidad de feromona $\Delta\tau_{ij}^k$ en el tramo ij :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1/L^k(t) & \text{si } (i,j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases}$$

donde $T^k(t)$ es el camino realizado por la hormiga k , y $L^k(t)$ es su longitud

- Si el camino es corto dejarán más feromona que si es largo

DISIPACIÓN DE FEROMONA

- Si solo se añade feromona, los tramos se saturarían \Rightarrow disipar feromona
- Al disipar la feromona se comporta como una memoria de mejores caminos históricos
- El depósito y la disipación de feromona se realiza de un solo golpe al final de cada ciclo:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t)$$

- $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$, m es el número de hormigas y $\rho \in (0, 1]$ es un coeficiente de evaporación de feromona
- Al final de cada ciclo la mejor hormiga añade una cantidad de feromona extra a los tramos de su recorrido
- Al principio todos los tramos del problema tienen una misma cantidad inicial de feromona: $\tau_{ij}(0)$

RESUMEN ACTUALIZACIÓN DE FEROMONA

- Cuando todas las hormigas han acabado recorridos se actualiza la feromona de toda la red
- Los tramos que no han sido visitados pierden feromona:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t)$$

- Los que sí han sido visitados disipan la misma feromona, pero cada hormiga que lo haya visitado le añade una cantidad de feromona proporcional al coste del camino efectuado por dicha hormiga:

$$\Delta\tau^k(t) = 1/L^k(t)$$

- Esto se hace para todas las hormigas por igual, excepto la hormiga cuyo coste de camino sea menor, que lo hace dos veces
- Además al ser el camino más corto añade más cantidad de feromona \Rightarrow elitismo

RESUMEN ACTUALIZACIÓN DE FEROMONA

- Cuando todas las hormigas han acabado recorridos se actualiza la feromona de toda la red
- Los tramos que no han sido visitados pierden feromona:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t)$$

- Los que sí han sido visitados disipan la misma feromona, pero cada hormiga que lo haya visitado le añade una cantidad de feromona proporcional al coste del camino efectuado por dicha hormiga:

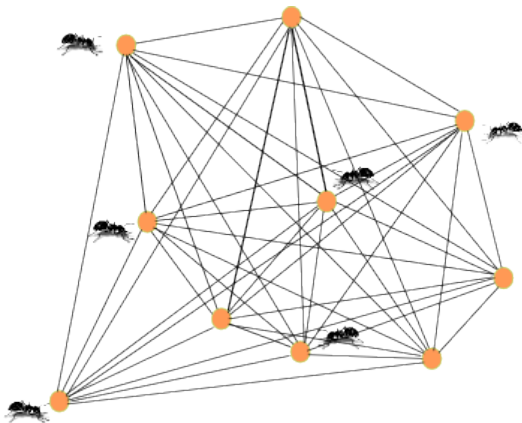
$$\Delta\tau^k(t) = 1/L^k(t)$$

- Esto se hace para todas las hormigas por igual, excepto la hormiga cuyo coste de camino sea menor, que lo hace dos veces
- Además al ser el camino más corto añade más cantidad de feromona \Rightarrow elitismo

TEMARIO

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ALGORITMOS GENÉTICOS
- 3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA
- 4 COMPUTACIÓN CON INSPIRACIÓN BIOLÓGICA
 - Coevolución
 - Enjambres de Partículas
 - Optimización mediante Colonias de Hormigas
 - Sistema de hormigas para el problema del viajante
- 5 BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA



DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

- Una hormiga es un agente que se mueve de ciudad en ciudad
- Cada hormiga decide a qué ciudad se desplaza en función de:
 - La cantidad de feromona del tramo
 - La longitud del mismo
 - Las hormigas prefieren tramos con más feromona y más cortos
- Se colocan m hormigas aleatoriamente en las ciudades del grafo
- En cada instante de tiempo, cada hormiga se desplaza hasta una nueva ciudad, incrementando la cantidad de feromona del tramo por el que se ha desplazado \Rightarrow **actualización local de tramos**
- Al final del recorrido se modifica la cantidad de feromona de los tramos que lo componen de forma inversamente proporcional a la longitud \Rightarrow **actualización global de tramos.**

DINÁMICA DE LAS HORMIGAS

- La hormiga k se encuentra en la ciudad i , elije moverse a otra ciudad j , de entre las que se encuentran en su memoria de trabajo \mathcal{N}_i^k mediante una regla pseudo-aleatoria proporcional
- Si $q \leq q_0$:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } j = \arg \max a_{ij} \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

- Si $q > q_0$

$$p_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i^k(t)} a_{il}(t)}$$

Donde a_{il} es el elemento de la tabla de decisión del tramo il

REGLA PSEUDO-ALEATORIA PROPORCIONAL

- $q_0 \in [0, 1]$ es un parámetro del sistema
- $q \in [0, 1]$ es un valor generado aleatoriamente en cada decisión
- Cuando $q \leq q_0$ la hormiga elige el tramo más eficaz
- Cuando $q > q_0$ la hormiga elige el tramo aleatoriamente, pero proporcional a su eficacia
- Al modificar el parámetro q_0 se regula el que el sistema se guíe por las mejores soluciones según su experiencia, o explore regiones desconocidas del espacio de búsqueda
- Si q_0 grande \Rightarrow más explotación
- Si q_0 pequeño \Rightarrow más exploración

ACTUALIZACIÓN LOCAL DE FEROMONA

- Cada vez que una hormiga k visita un camino, la feromona del mismo se actualiza mediante:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \varphi)\tau_{ij}(t) + \varphi\tau_0/2$$

- φ es la tasa de volatilidad, y τ_0 la cantidad inicial de feromona
- Esto hace que un arco visitado pierda feromona
- Si el arco visitado ganara feromona \Rightarrow las hormigas se seguirían unas a otras
- Queremos que las hormigas exploren cada una alternativas diferentes
- Si los arcos visitados pierden feromona \Rightarrow las hormigas preferirán arcos poco visitados
- Se elige $\tau_0 = nL_{nn}^{-1}$, n número de hormigas, L_{nn} longitud de la solución con K- nn

ACTUALIZACIÓN GLOBAL DE TRAMOS

- Premiar los tramos pertenecientes a los recorridos más cortos
- La mejor hormiga deposita una cantidad de feromona en los tramos de su recorrido
- La cantidad de feromona depositada es inversamente proporcional a la longitud del recorrido L^+ :

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t),, ij \in T^+$$

Donde $\Delta\tau_{ij}(t) = 1/L^+$, y T^+ es el recorrido de la mejor hormiga

MODIFICACIÓN DEL ACO PARA EL TSP

- Se han introducido tres modificaciones del método original:
 - 1 Actualización global de tramos solo para la hormiga ganadora
 - 2 Actualización local de tramos paso a paso. En el método general se hacía al final del ciclo
 - 3 Utilización de la regla proporcional pseudo-aleatoria para la elección de nodos

MODIFICACIÓN DEL ACO PARA EL TSP

- Se han introducido tres modificaciones del método original:
 - 1 Actualización global de tramos solo para la hormiga ganadora
 - 2 Actualización local de tramos paso a paso. En el método general se hacía al final del ciclo
 - 3 Utilización de la regla proporcional pseudo-aleatoria para la elección de nodos

MODIFICACIÓN DEL ACO PARA EL TSP

- Se han introducido tres modificaciones del método original:
 - 1 Actualización global de tramos solo para la hormiga ganadora
 - 2 Actualización local de tramos paso a paso. En el método general se hacía al final del ciclo
 - 3 Utilización de la regla proporcional pseudo-aleatoria para la elección de nodos

MODIFICACIÓN DEL ACO PARA EL TSP

- Se han introducido tres modificaciones del método original:
 - 1 Actualización global de tramos solo para la hormiga ganadora
 - 2 Actualización local de tramos paso a paso. En el método general se hacía al final del ciclo
 - 3 Utilización de la regla proporcional pseudo-aleatoria para la elección de nodos

EXPERIMENTOS

- realizados por Dorigo y Gambardella
- Los métodos a comparar son:
 - Colonias de hormigas artificiales (CHA)
 - Simulated Annealing (SA)
 - Red elástica de Kohonen (EN)
 - Mapas autoorganizativos (SOM)
 - Algoritmos genéticos (AG)
 - Programación evolutiva (OE)
 - Combinación de algoritmos genéticos y simulated annealing (SG)

PARÁMETROS Y RESULTADOS

- Parámetros:

m	β	α	q_0	τ_0
10	2	0,1	0,9	$(n \times L_{nn})^{-1}$

Donde L_{nn} es la longitud del camino producido por el método de los vecinos más próximos, y n es el número de ciudades.

- Resultados de 5 problemas con 50 ciudades (media de los mejores resultados con cada método):

Problema	CHA	SA	EN	SOM	FI
Conj. 1	5,86	5,88	5,98	6,06	6,03
Conj. 2	6,05	6,01	6,03	6,25	6,28
Conj. 3	5,57	5,65	5,70	5,83	5,85
Conj. 4	5,70	5,81	5,86	5,87	5,96
Conj. 5	6,17	6,33	6,49	6,70	6,71

RESULTADOS SOBRE LIBRERÍAS

Resultados para 30, 50, 75 y 100 ciudades. Mejor resultado y número de soluciones visitadas:

Problema	CHA	AG	PE	SA	SG	ptimo
Oliver30 30 ciud.	420 (423,74) [830]	421 (N.D.) [3.200]	420 (423,74) [40.000]	424 (N.D.) [24.617]	420 (N.D.) [12.620]	420 (423,74)
Eil50 50 ciud.	425 (427,96) [1.830]	428 (N.D.) [25.000]	426 (427,86) [100.000]	443 (N.D.) [68.512]	436 (N.D.) [28.111]	425 (N.D.)
Eil75 75 ciud.	535 (542,31) [3.480]	545 (N.D.) [80.000]	542 (549,18) [325.000]	580 (N.D.) [173.250]	561 (N.D.) [95.506]	535 (N.D.)
KroA100 100 ciud.	21.282 (21.285,44) [4.820]	21.761 (N.D.) [103.000]	(N.D.) (N.D.) [N.D.]	(N.D.) (N.D.) [N.D.]	(N.D.) (N.D.) [N.D.]	21.282 (N.D.)

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ALGORITMOS GENÉTICOS
- 3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA
- 4 COMPUTACIÓN CON INSPIRACIÓN BIOLÓGICA
 - Coevolución
 - Enjambres de Partículas
 - Optimización mediante Colonias de Hormigas
 - Sistema de hormigas para el problema del viajante
- 5 **BIOLÓGÍA Y COMPUTACIÓN**