

Obliczenia z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

wykład III

Systemy mrówkowe

Joanna Kołodziejczyk

marzec 2016

Plan wykładu

- 1 Inspiracje biologiczne
 - Informacje ogólne
 - Naturalna optymalizacja
- 2 Artificial Ants
- 3 Podsumowanie
- 4 Literatura

Biologia

- Owady społeczne z rodziny Formicidae.
- Należą do rzędu błonkoskrzydłych.
- 22000 gatunków
- Żyją w koloniach o licznosci od kilkuset do miliona osobników.
- Duże kolonie składają się głównie z robotnic, wojowników (bezpłodnych), trutni oraz płodnych osobników żeńskich nazywanych królową.
- Nazywane superorganizmem, gdyż tylko współpraca daje pełną funkcjonalność całej kolonii.
- W społeczności mrówek istnieje podział pracy.
- Wykazują się umiejętnością komunikacji między osobnikami i zdolnością do rozwiązywania złożonych problemów.

Biologia

Feromon

Jest to wydzielany lub wydalany czynnik chemiczny, który wywołuje reakcje społeczne na osobniki tego samego gatunku. Istnieją feromony alarmowe, feromony szlaków żywności, feromony seksualne i wiele innych, które wpływają na zachowanie lub fizjologię jednostki odbierającej sygnał.

Znaczenie ścieżki

Mrówki znaczą ścieżki do pożywienia lotnymi węglowodorami. Niektóre mrówki znaczą wstępny szlak feromonowy oznaczając jak wrócić do gniazda z pokarmem. Ta trasa przyciąga inne mrówki i służy jako przewodnik. Tak długo, jak długo istnieje źródło pożywienia, ślad feromonowy będzie stale odnawiany. Feromon musi być stale kładziony, gdyż szybko odparowuje. Gdy pokarm się kończy, to i szlak się kończy. U wielu gatunków mrówek, szlaki, które już nie prowadzą do żywności są również oznaczone feromonem odstraszaczem.

Jak mrówki optymalizują drogę?

- Mrówki potrafią określić stężenie feromonu na ścieżce.
- Bardziej atrakcyjna jest ścieżka z dużą ilością feromonu.
- Krótsze ścieżki będą intensywniej oznaczone.
- Przez to są lepiej utrwalane.
- Mrówki korzystając ze zbiorowej inteligencji zawsze wyznaczają trasę do pożywienia będącą prostą.
- Feromon przekazuje informację pomiędzy jednostkami przez sieć.

Przykład - start

Stan początkowy

Brak informacji o położeniu pożywienia w środowisku.

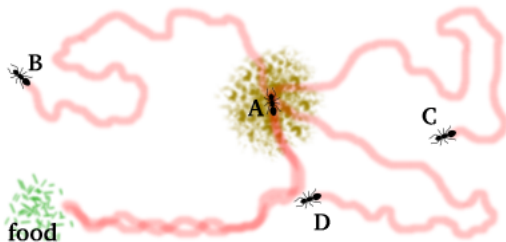
Rozwiązanie ludzkie	Rozwiązanie mrówcze
Przeczesać teren w poszukiwaniu jedzenia wysyłając zwiad. Po znalezieniu pożywienia poinformowanie innych o tym fakcie i przekazanie informacji o jego położeniu.	Mrówki wychodzą z mrowiska i chodzą po losowych ścieżkach. Aby wrócić do domu każda mrówka zostawia ślad feromonowy.



Przykład - powrót do mrowiska

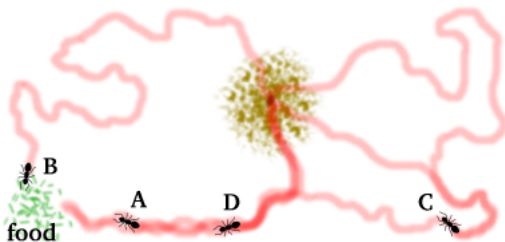
Znaleziono pokarm

Celem jest powrót do mrowiska. Mrówka śledzi ślad feromonowy, czyli podąża pozostawionym przez siebie śladem. Idąc tą samą drogą znów mrówka znaczy ścieżkę feromonem.



Inne mrówki

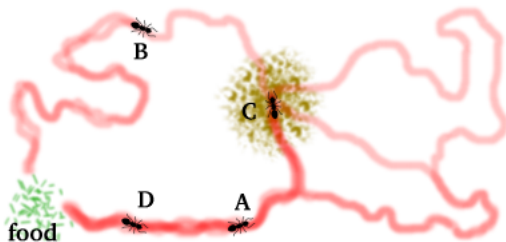
- A Mrówka wróciła do domu i ponownie idzie do pokarmu własną ścieżką, gdyż leży na niej podwójny ślad feromonowy.
- B Dotarła do tego samego źródła pokarmu własną ścieżką i nią wróci.
- C Znalazła szlak feromonowy pozostawiony przez mrówkę D i nim podąża.
- D Znalazła podwójny szlak feromonowy pozostawiony przez mrówkę A i nim podąża.



Podążanie szlakiem feromonowym

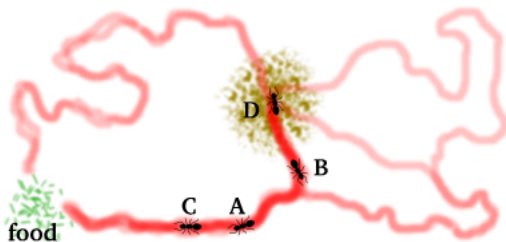
Jeżeli mrówka wraca do mrowiska bez jedzenia, to znów po nie wyrusza wykorzystując ślady feromonowe.

- A Niesie do mrowiska pokarm.
- B Niesie do mrowiska pokarm, na swojej drodze nie spotka innych mrówek.
- C Podąża do mrowiska bez pokarmu.
- D Podąża do mrowiska bez pokarmu.



Najkrótsza droga do pokarmu

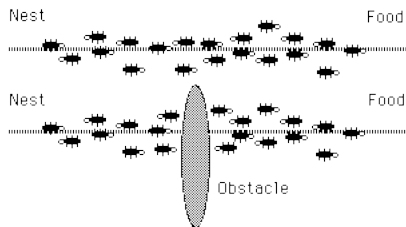
- 1 Mrówka śledzi drogę o największym stężeniu feromonu.
- 2 Krótsze trasy są znaczone szybciej kończono.
- 3 Na przykład, jeśli mrówka X porusza się po drodze 10-metrowej wielokrotnie, a mrówka Y porusza się po innej 20-metrowej drodze, to mrówka X przemierzy swoją trasę dwukrotnie, gdy Y zrobi to jednokrotnie.
- 4 X pozostawi na swojej ścieżce dwa razy więcej feromonu.



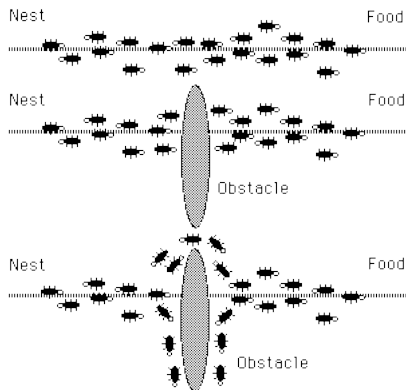
Jeszcze jeden przykład



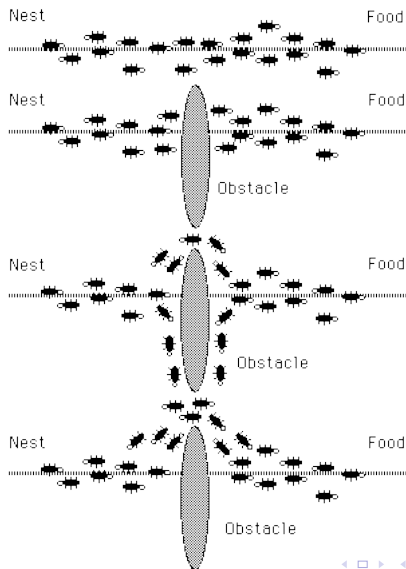
Jeszcze jeden przykład



Jeszcze jeden przykład



Jeszcze jeden przykład



Reguły postępowania

Warunki	Akcja
Nie niesie pokarmu i nie jest na szlaku feromonowym	poruszaj się losowo i znac feromon
Nie niesie pokarmu i jest na szlaku feromonowym	idź po szlaku i znac feromon
Osiągnięcie mrowiska bez pokarmu po szlaku feromonowym	odwróć się i wejdź na szlak w odwrotnym kierunku
Dotarcie do pokarmu	weź pokarm, odwróć się i wejdź na szlak w odwrotnym kierunku
Niesie pokarm	idź po szlaku i znac feromon
Przyniesienie pokarmu do mrowiska	zostaw pokarm, odwróć się i wejdź na szlak w odwrotnym kierunku

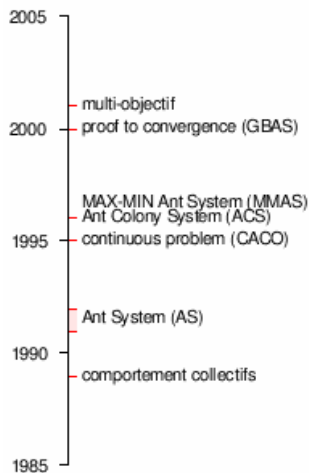
Plan wykładu

- 1 Inspiracje biologiczne
- 2 Artificial Ants
 - Historia
 - ACO meta-heuristic
 - Przykład rozwiązania problemu TSP
- 3 Podsumowanie
- 4 Literatura

Jak powstawały algorytmy mrówkowe

- 1 AS — Ant System (Marco Dorigo 1991) do rozwiązywania problemów kombinatorycznych;
- 2 ACS — Ant Colony System (Dorigo, Gambardella, 1997) modyfikacja AS
- 3 $MAX - MIN$ Ant System (Stutzle, Hoos, 1998) modyfikacja AS
- 4 AS_{rank} (Bullnheimer, 1997) modyfikacja AS
- 5 ACO — Ant Colony Optimization Metaheuristic (Dorigo 2002) uogólnienie wariantów AS, przeznaczone do optymalizacji problemów dyskretnych.

Jak powstawały algorytmy mrówkowe



http://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization

Dyskretny problem optymalizacyjny — definicja

- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_C}\}$: skończony zbiór składników.
- $L = \{I_{c_i c_j} | (c_i, c_j) \in \tilde{C}, |L| \leq N_C^2\}$ Skończony zbiór możliwych połączeń/przejść pomiędzy elementami \tilde{C} , gdzie \tilde{C} jest podzbiorem produktu kartezjańskiego $C \times C$.
- $J_{c_i c_j} \equiv J(I_{c_i c_j}, t)$ jest kosztem połączenia, funkcją związaną z każdym $I_{c_i c_j} \in L$ i prawdopodobnie związaną z czasem t .
- $\Omega \equiv \Omega(C, L, t)$ zbiór ograniczeń powiązany z elementami C i L
- $s = \langle c_i, c_j, \dots, c_k, \dots \rangle$ jest ciągiem elementów z C (lub równoważnie z L). s jest nazywane stanem problemu. Jeżeli S to zbiór wszystkich możliwych sekwencji, to \tilde{S} jest podzbiorem wszystkich możliwych stanów z uwzględnieniem ograniczeń Ω na zbiorze S . $|s|$ to długość stanu i jest równa liczbie składników w ciągu s .

Dyskretny problem optymalizacyjny — definicja cd.

- Dla danych dwóch stanów s_1 i s_2 *sąsiednia struktura* definiuje się gdy stan s_2 jest sąsiadem s_1 i oba stany są z S i stan s_2 może być osiągnięty przez wykonanie jednego logicznego kroku. Sąsiedztwo oznaczono jako \mathcal{N}_s .
- ψ oznacza rozwiązanie ze zbioru elementów \tilde{S} .
- $J_\psi(L, t)$ jest kosztem przypisanym każdemu rozwiązaniu ψ . Jest funkcją wszystkich kosztów $J_{c_i c_j}$, czyli wszystkich połączeń rozwiązania ψ .

Rozważmy graf $G = (C, L)$ powiązany z zadaniem optymalizacji dyskretniej. Rozwiązanie problemu optymalizacyjnego może być wyrażone jako dozwolona ścieżka w grafie G . ACO ma znaleźć ścieżkę o minimalnym koszcie. W TSP C to zbiór miast, L zbiór dróg pomiędzy miastami, a ψ jest cyklem Hamiltona.

Jak działa ACO

- Stosuje populację mrówek, które działając w kooperacji rozwiążą problem optymalizacyjny używając zdefiniowanej wcześniej notacji grafu.
- Informacja zbierana przez mrówki podczas procesu przeszukiwania jest przechowana w śladzie feromonowym τ_{ij} dla połączenia $l_{ij} \equiv l_{c_i c_j}$. Ślad feromonowy koduje pamięć długotrwałą o całym procesie przeszukiwania wykonanym przez mrówkę.
- Ścieżka feromonowa może dotyczyć wszystkich łuków lub tylko wybranych.
- Łuki mają przypisaną też wartość heurystyczną η_{ij} reprezentującą wiedzę a priori o problemie lub czasie wykonania pochodzącym z innego źródła niż mrówki.

Cechy mrówki

- Mrówka poszukuje rozwiązania o najniższym koszcie $\check{J}_\psi = \min_\psi J_\psi(L, t)$
- Mrówka k ma pamięć \mathcal{M}^k , by przechowywać informacje o ścieżkach, które dotychczas przeszła. Pamięć ta wykorzystywana jest do budowania dopuszczalnych rozwiązań, oceny znalezionej ścieżki i by wrócić do poprzedniej ścieżki.
- Mrówka k w stanie $s_r = \langle s_{r-1}, i \rangle$ może iść do dowolnego węzła j w jego dopuszczalnym sąsiedztwie $\mathcal{N}_i^k = \{j | (j \in \mathcal{N}_i) \wedge (\langle s_r, j \rangle \in \tilde{\mathcal{S}})\}$.
- Do mrówki k może być przypisany stan początkowy s_s^k i jeden lub więcej warunków zakończenia e^k . Stan początkowy jest najczęściej pojedynczym składnikiem.
- Mrówka porusza się od stanu początkowego do możliwych stanów i przyrostowo buduje rozwiązanie. Poszukiwanie zostaje zakończone, gdy co najmniej jedna mrówka spełni co najmniej jeden warunek zakończenia.

Cechy mrówki cd.

- Mrówka k będąc w węźle i może przesunąć się do węzła j wybranego z \mathcal{N}_i^k . Ruch jest wybierany na podstawie pewnych probabilistycznych reguł decyzyjnych.
- Probabilistyczna decyzja mrówki jest funkcją:
 - wartości przechowywanych w strukturze $\mathcal{A}_i = [a_{ij}]$ nazywaną *ant-routing table* otrzymaną jako złożenie wartości heurystycznej i śladu feromonowego lokalnego węzła.
 - prywatnej pamięci mrówki
 - ograniczeń zadania.
- Przesuwając się z węzła i do j mrówka może odświeżyć ślad feromonowy τ_{ij} na łuku (i, j) . Ten krok nazywa się *online step-by-step pheromone update*
- Kiedy mrówka zbuduje rozwiązanie, na przemierzonym szlaku wstecznie odświeża ślad feromonowy. Ten krok nazywa się *online delayed pheromone update*.
- Potem mrówka umiera.

Działanie kolonii

- Aby znaleźć zadowalające wyniki mrówki muszą ze sobą współpracować.
- Każda mrówka korzysta tylko ze swojej prywatnej informacji i lokalnej informacji dotyczącej odwiedzanego węzła.
- Komunikacja między mrówkami nie jest bezpośrednia i odbywa się przez pisanie/czytanie zmiennych przechowujących wartości feromonów.
- Mrówki adaptacyjnie modyfikują sposób, w jaki inne mrówki reprezentują i odbierają problem. Ale same nie podlegają adaptacji.

Procedura odparowywania feromonu

Parowanie feromonu

Jest to proces w wyniku którego intensywność śladu feromonowego w połączeniach automatycznie ulega zmniejszeniu z czasem.

Feromon jest to sposób na zabezpieczenie przedwczesnej zbieżności algorytmu do rozwiązań suboptymalnych. Implementuje pewien sposób zapominania mobilizujący do eksploracji przestrzeni problemu, które nie były jeszcze odwiedzane.

Deamon actions

Jest wykorzystywany opcjonalnie. Stosuje się do wykonywania scentralizowanych akcji, które nie mogą być wykonane przez pojedynczą mrówkę. Przykłady:

- Aktywacja lokalnej metody optymalizacji.
- Gromadzenie globalnej informacji, którą można użyć do podjęcia decyzji czy korzystne będzie dodanie feromonu, by ograniczyć proces poszukiwania, co jest oceniane z perspektywy globalne.
- Demon może obserwować ścieżkę odnaniezoną przez każdą mrówkę i wybrać zwiększenie śladu feromonowego na łukach w najkrótszej ścieżce (off-line pheromone updates).

ACO meta-heuristic

ACO Meta-heuristic()

Wykonuj dopóki nie spełnione są warunki zakończenia (max iteracji lub CPU time).

Rozpocznij schedule activities

- 1 ants generation and activity
- 2 pheromone evaporation
- 3 daemon actions {Opcjonalnie}

Zakończ procedurę schedule activities

Przed uruchomieniem wykonuje się krok ustawiający wartości parametrów i inicjalizujący ślady feromonowe.

Dodatkowo nie ma mowy o sposobie synchronizacji pomiędzy tymi krokami. Pozostaje to w gestii projektanta systemu.

Procedura ants generation and activity

ants generation and activity

Wykonuj dopóki masz zasoby

- 1 schedule the creation of a new ant
- 2 new active ant

Procedura **new active ant** — ant lifecycle

- 1 initialize ant
- 2 \mathcal{M} = update ant memory()
- 3 while (current state \neq target state)
 - 1 \mathcal{A} = read local ant-routing table()
 - 2 \mathcal{P} = compute transition probabilities ($\mathcal{A}, \mathcal{M}, \Omega$)
 - 3 next state = apply ant decision policy (\mathcal{P}, Ω)
 - 4 move to next state(next state)
 - 5 if (online step-by-step pheromone update)
 - 1 deposit pheromone on the visited arc()
 - 2 update ant-routing table()
 - 6 \mathcal{M} = update internal state()
- 4 if (online delayed pheromone update)
foreach visited arc $\in \psi$ do
 - 1 deposit pheromone on the visited arc()
 - 2 update ant-routing table()
- 5 die()

Rozwiązanie TSP procedurą AS

Ant System — działanie

- 1 m mrówek jest w m miastach. Dla każdej mrówki stan początkowy (miasto początkowe) jest wybierane losowo.
- 2 Pamięć \mathcal{M}^k każdej k -tej mrówki jest wypełniana stanem bieżącym dodanym do listy już odwiedzonych miast (na początku lista pusta).
- 3 Następnie mrówki wchodzą w cykl (pętla while na poprzednim rysunku), który trwa \mathcal{N}_C iteracji, czyli tyle, by każda mrówka przeszła całą trasę.
- 4 W każdym kroku mrówka będąca w węźle i -tym rozważa możliwe stany sąsiednie czytając elementy tablicy \mathcal{A}_i wężła i , oblicza prawdopodobieństwo przejścia do tego stanu i stosuje regułę decyzyjną, by wybrać kolejne miasto, przejść do niego i odświeżyć zawartość pamięci.
- 5 W procedurze AS nie ma **online step-by-step pheromone update**

Rozwiązanie TSP procedurą AS - cd.

- 6 Kiedy mrówki przejdą trasę (równolegle), użyją pamięci by ocenić zbudowane rozwiązanie i przejść ją wstecz i zwiększyć na niej ilość feromonu τ_{ij} na odwiedzonych łukach l_{ij} . To będzie miało efekt na decyzję przyszłych mrówek. Potem mrówka umiera zwalniając zaalokowane zasoby.
- 7 W AS wszystkie mrówki zostawiają ślad feromonowy i nie stosuje się lokalnej optymalizacji.
- 8 Ilość feromonu na połączeniu τ_{ij} reprezentuje wyuczoną potrzebę przejścia do miasta j jeżeli mrówka jest w mieście i (mrówka chce włączyć łuk l_{ij} do swojej ścieżki). Informacja feromonowa zmienia się odwzorowuje dotychczasowe doświadczenie pozyskiwane przez mrówki podczas rozwiązywania problemu. Ilość feromonu jest proporcjonalna do jakości rozwiązania ψ .

Rozwiązanie TSP procedurą AS — pamięć mrówki \mathcal{M}^k

- Pamięć nazywana jest też wewnętrznym stanem mrówki i zawiera już odwiedzone miasta.
- Pamięć jest używana, by zdefiniować dla każdej mrówki będącej w mieście i zbiór miast, które jeszcze musi odwiedzić.
- Przez przeglądanie \mathcal{M}^k mrówka może wybierać dozwolone stany kolejne.
- Na podstawie pamięci mrówka może obliczyć całkowity koszt pokonanej drogi i obliczyć ile feromonu odłożyć na jej odcinkach.

Rozwiązanie TSP procedurą AS — ant-routing table \mathcal{A}_i

- $\mathcal{A}_i = [a_{ij}(t)]$ dla węzła i , gdzie \mathcal{N}_i jest zbiorem wszystkich sąsiednich węzłów dla i , jest otrzymywana na podstawie następującej funkcji wynikającej z rozkładu feromonu $\tau_{ij}(t)$ i wartości heurystycznej η_{ij} :

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

- α i β to parametry sterujące dla feromonu i wartości heurystycznej.
- Jeżeli $\alpha = 0$, to wybierane będzie najbliższe miasto (greedy algorithm).
- Jeżeli $\beta = 0$, to tylko feromon struje strategią, co prowadzi do przedwczesnej zbieżności i stagnacji.
- Sprawdzony zestaw to: $\alpha = 1$, $\beta = 5$
- Wartość heurystyczna użyta dla TSP to: $\eta_{ij} = 1/J_{C_i C_j}$, czyli odwrotność odległości pomiędzy miastami i i j .

Rozwiązanie TSP procedurą AS — reguły decyzyjne

- Prawdopodobieństwo $p_{ij}^k(t)$, że k -ta mrówka w iteracji t wybierze przejście z miasta i do miast j wyznacza się jako:

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

- \mathcal{N}_i^k jest dopuszczalnym sąsiedztwem wężła i dla mrówki k (zbiorem nie odwiedzonych jeszcze miast) wyznaczonego na podstawie pamięci mrówki.

Rozwiązanie TSP procedurą AS — ślad feromonowy

- Każda mrówka po zbudowaniu trasy pozostawia pewien ślad feromonowy $\Delta\tau^k(t) = 1/J_{\psi}^k(t)$ na każdym połączeniu l_{ij} swojej trasy o długości $J_{\psi}^k(t)$:

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow \tau_{ij}(t) + \Delta\tau^k(t), \forall l_{ij} \in \psi^k(t), k = 1, \dots, m$$

- liczba mrówek m jest stała w każdej iteracji i jest ustawiana na $m = N_C$.
- Zatem $\Delta\tau^k(t)$ jest funkcją jakości mrówki.

Rozwiązanie TSP procedurą AS — parowanie feromonu

- Po uaktualnieniu wszystkich informacji przez mrówki odparowuje się feromon zgodnie z regułą:

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

- $\rho \in (0, 1]$ jest współczynnikiem odparowywania.
- Sprawdzona wartość $\rho = 0.5$.
- Początkowe wartości feromonu $\tau_{ij}(0)$ ustawia się na stałe małe dodatnie wartości τ_0 dla wszystkich łuków.

Plan wykładu

- 1 Inspiracje biologiczne
- 2 Artificial Ants
- 3 Podsumowanie**
- 4 Literatura

Zastosowania

- wiele problemów kombinatorycznych
- trasowanie w systemach telekomunikacyjnych
- wszystkie typy zadań harmonogramowania
- klasyfikacja
- drążenie danych
- przetwarzanie obrazów
- systemu identyfikacji
- inteligentny system testowania i wiele innych

Zalety i wady

- W przeciwieństwie do symulowanego wyżarzania czy algorytmów ewolucyjnych nadaje się do rozwiązywania problemów zmiennych w czasie rzeczywistym. Mrówki cały czas mogą adaptować się do nowych warunków środowiska.
- Trzeba pamiętać, że ACO znajduje najkrótszą ścieżkę w grafie, ale należy ją wykorzystywać tam, gdzie metody deterministyczne zawodzą.
- Ze względu na możliwość zrównoleglenia jest bardzo efektywnym rozwiązaniem dla środowisk rozproszonych.

Plan wykładu

- 1 Inspiracje biologiczne
- 2 Artificial Ants
- 3 Podsumowanie
- 4 Literatura**

Wykorzystana literatura (do samodzielnego studiowania)



Oleg Kovarik

Ant Colony Optimization for Continuous Problems.

<http://fakegame.sourceforge.net/lib/exe/fetch.php?media=ants-optimalizace.pdf>



Marco Dorigo

Ant Colony Optimization

<http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/RealAnts.html>



MUTE File Sharing

How Ants Find Food

<http://mute-net.sourceforge.net/howAnts.shtml>