

CASE STUDY

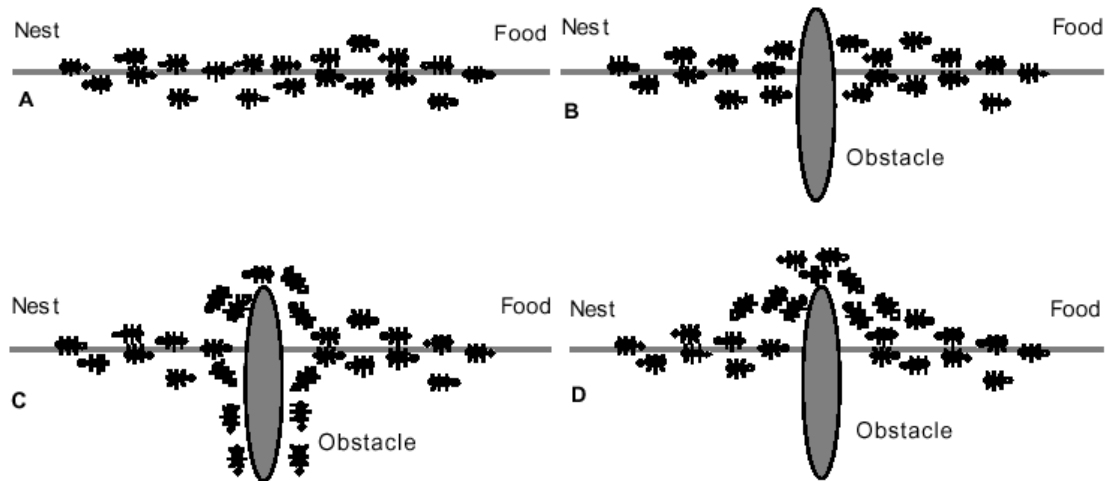
Riešenie problému obchodného cestujúceho pomocou kolónie mravcov

Juraj Frivolt

Úvod

Mnoho algoritmov a metód v umelej inteligencii je inšpirovaná biológiou. Metóda riešenia pomocou kolónie mravcov je založená na simulácii mravcov prechádzajúcich sa po grafe alebo bludisku, ktorí sa orientujú pomocou feromónov.

Princíp riešenia problémov pomocou kolónie mravcov prvýkrát použil Marco Dorigo a kol. na riešenie ťažkých (NP-úplných) problémov na grafoch. Na demonštráciu princípu uvediem scénu pre prechádzanie sa mravcov cez nasledujúci príklad. V nasledujúcom berieme do úvahy idealizované mravce.



Mravce prechádzajú z mraveniska k jedlu. Na obrázku A medzi mraveniskom a jedlom nie je prekážka. Po zjavení sa prekážky mravce ešte vôbec nepoznajú tvar a veľkosť prekážky, vyberú sa náhodným smerom, buď hore alebo dole. Mravce po svojej ceste zanechávajú feromóny (*lokálne zvýšenie hladiny feromónov*). Ostatné mravce sa vyberú tým smerom, kde je viac feromónu. Mravec, ktorý sa dostal k jedlu, sa vráti po trase, ktorou sa dostal k jedlu (*globálne zvýšenie hladiny feromónov*). Pričom každý prechod cez cestu stojí mravca čas. Mravce, ktoré si vybrali lacnejšiu cestu sa dostanú k jedlu skôr, teda tieto cesty budú častejšie zvýhodnené pomocou globálneho zvýšenia hladiny feromónov.

Zaviedli sme operácie *lokálnej* a *globálnej* zmeny feromónov na ceste. Na cestách sa však feromóny *vyparujú*, teda ak nejaká križovatka nebola dávno navštívená mravcom, potom sa postupne rozdiely medzi cestami znižujú, až kým mravec môže akurát hodiť mincou, ktorou cestou sa vyberie.

Akú má šancu na nájdenie cesty jeden mravec? Môže nájsť najkratšiu cestu štatisticky pravdepodobnejšie ako inú cestu? Mravce po grafe akoby pretekali. Najrýchlešie z nich (ktoré našli kratšiu) cestu ocenia svojim „výťazstvom“ svoju cestu. Jeden mravec však nemá súpera. Dochádza k emergujúcemu správaniu medzi mravcami.

Uvedený príklad na hľadanie najkratšej cesty je však jeden z grafových problémov, ktoré sa dajú mraveniskovými algoritmami riešiť. V tejto práci sa sústredíme na problém obchodného cestujúceho v grafe. Oproti problému najkratšej cesty tento problém je *NP-úplný*. V prípade uspokojivých výsledkov sa dajú mraveniskové algoritmy použiť - po pretransformovaní problému - na riešenie iných úloh z triedy *NP*.

Úloha

V tejto práci budeme riešiť problém obchodného cestujúceho. Daný je graf s ohodnotenými hranami a n mravcov, ktoré sa pohybujú na grafe, pričom po svojej ceste rozkladajú feromóny. Mravce sa rozhodujú podľa miery feromónu na hranách.

Model kolónie mravcov

Graf má **hrany** ohodnotené kladnými prirodzenými číslami. Hrany majú dve strany a obe strany majú rôznu úroveň feromónov. Na každej hrane visí jeden *timer*, ktorý po vypršaní istého času zníži úroveň feromónov na hrane.

Mravce majú:

- Pozíciu – mravec sa môže nachádzať na uzle na hrane. Ak je na hrane, môže byť na oboch stranách hrany. Kvôli simulácii je presne určené, kde presne sa nachádza (počas simulácie sa zobrazuje mravec ako sa presúva na hrane).
- Cestu – Mravec si počas prechádzania cez graf zapisuje svoju cestu. Týmto spôsobom má možnosť na spätné vrátenie sa na po tejto ceste, alebo zmenu úrovne feromónov na ceste. Túto operáciu vykoná, ak dosiahne svoju úlohu (napr. pri obchodnom cestovaní, ak prešiel všetky uzly)
- Množinu navštívených uzlov – Uzly, ktoré už boli navštívené, sú zaradené do množiny. Počas putovania mravce nenavštívia jeden uzol dvakrát.
- Počiatočnú pozíciu – Mravec sa môže vrátiť na počiatočnú pozíciu, takto môže urobiť kruh okolo všetkých uzlov v grafe.

Operácie vykonávané mravcami na hranách

- Lokálna zmena feromónov – Mravec zmení úroveň feromónov iba na hrane, na ktorej sa práve nachádza.
- Globálna zmena feromónov – Mravec zmení úroveň feromónov na celej ceste, po ktorej prešiel.

Mravec má možnosť vybrať si z hrán, ktoré sú incidentné s uzlom, na ktorej sa nachádza. Vyberie si hranu, ktorá má vyššiu úroveň feromónov, pričom si nevyberie hranu, ktorá vedie do uzlu, ktorú už niekedy navštívil. Ak z uzlu nevie postúpiť na žiadnu hranu (lebo vedú na navštívené uzly), tak si nevyberie žiadnu hranu a svoje putovanie skončí. V prípade, že mravec našiel cestu, vykonal svoju úlohu, na ceste, ktorou prešiel, zvýši feromóny.

Mravce, riešiacie rôzne úlohy, majú rôzny cieľ, v rôznych situáciách považujú svoje putovanie za ukončené. Porovnajme modely riešiacie problém obchodného cestujúceho s problémom najkratšej cesty.

Rozdiely medzi mravcami pre rôzne úlohy

Mravce majú rôzne správania pre rôzne úlohy, pričom rozdiel v ich správaní sa najviac odzrkadľuje v stanovení podmienky úspešného putovania, t.j. keď sa na cestu aplikuje globálne zvýšenie úrovne feromónov.

Problém obchodného cestujúceho

Pri riešení tejto úlohy mravce po navštívení každého vrcholu sa pozrú z aktuálneho vrcholu, či majú možnosť prejsť do počiatočného uzlu (uzatvoriť kruh). Ak nie, tak začnú nové putovanie bez globálneho zvýšenia úrovne feromónov na ceste. V opačnom prípade zvýšia pravdepodobnosť na prechod po absolvovanej ceste globálnym zvýšením úrovne feromónov.

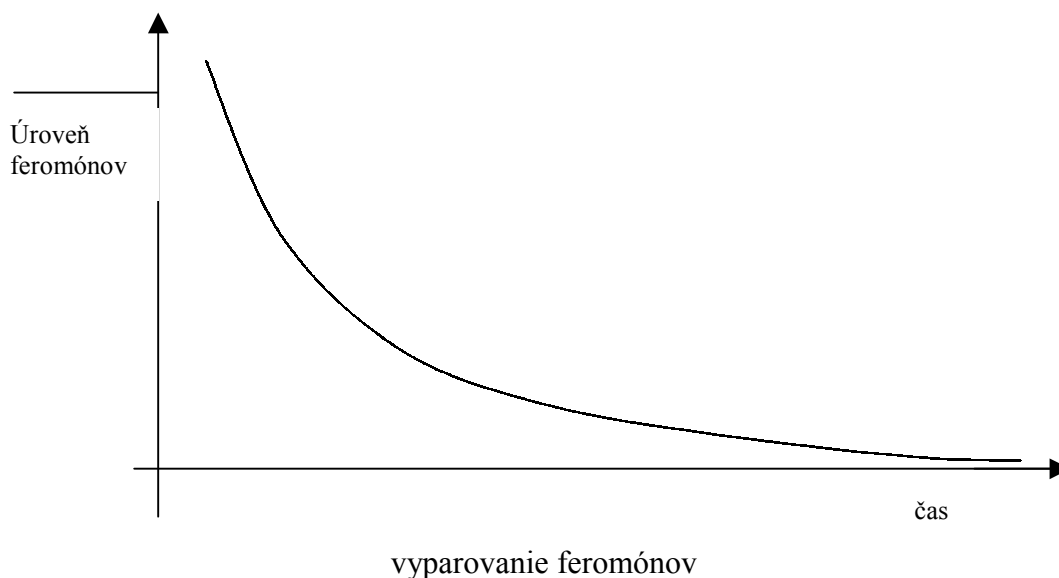
Pri začatí putovania mravec sa nachádza na *náhodne vybratom uzle* grafu.

Problém nájdania najkratšej cesty medzi dvoma vrcholmi

Mravec prešiel svoju cestu úspešne, ak z počiatočného vrcholu sa dostal do cieľového. Inak, ak sa počas putovania stane, že mravec z aktuálneho uzlu sa nevie presunúť na žiadny iný vrchol, lebo už boli navštívené, tak začne nové putovanie.

Počiatočný stav mravca môže byť rôzny pre túto úlohu:

1. Mravec sa nachádza *na jednom, danom uzle* grafu
2. Mravec sa nachádza *na náhodne vybratom uzle* grafu



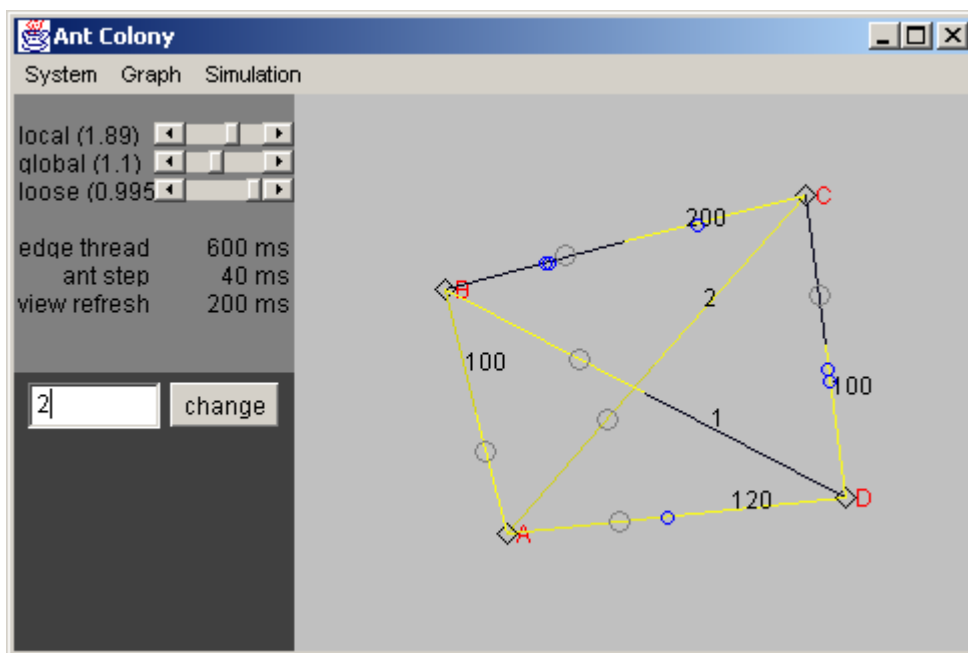
Simulácia

Na prezentáciu algoritmu je naprogramovaná aplikácia. Je vytvorený v prostredí Java.

Na začiatku treba nadefinovať graf alebo ju nahráť z disku. Na vytváranie grafu slúži menu *graph*. Vytváranie uzlov sa robí výberom menu *graph / add node*. Uzly sa spájajú určením koncových uzlov po výbere menu *graph / add edge*. Pri vytváraní hrany ešte určíme aj jeho dĺžku (pozitívne celé číslo). Uzly sa dajú presúvať, vymazávať.

Graf sa nahrá z disku z menu *system / load*. Vytvorený graf sa uloží z *system / save*

Po definovaní grafu môžeme spustiť simuláciu z menu *simulation / start*. Mravce sa pohybujú na hranách grafu s rýchlosťou priamo úmerne dĺžke. Úroveň feromónov na hranách je znázornená farbami. Mravce sú pohybujúce sa guľičky.



Pred spustením simulácie sa majú nastaviť parametre:

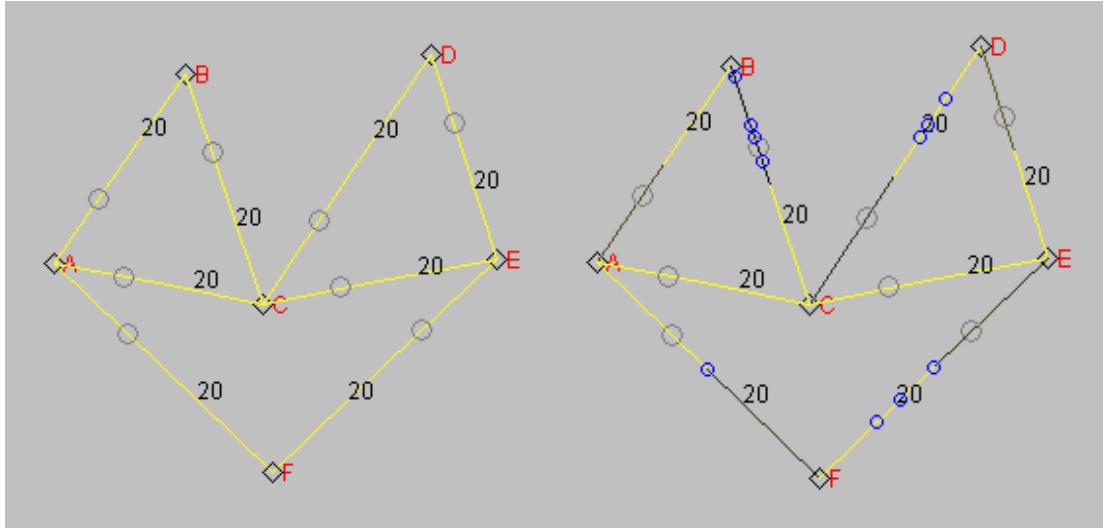
- Local (F_{local}) – lokálne zvýšenie hladiny feromónov. Možné hodnoty sú v rozpetí 0-3. V prípade hodnoty menšej ako 1, mravec pri výbere hrany zníži úroveň feromónov na hrane.
- Global (F_{global}) – globálne zvýšenie hladiny feromónov. Hodnoty sa pohybujú medzi 0-3
- Loose (F_{loose}) – Vyparovanie feromónov z hrán. Hodnoty sú medzi 0-1.

Aplikácia používa niekoľko časovačov. Vyprchávanie feromónu z hrán sa uskutoční každých 600 ms. Mravce urobia krok na hrane za 40 ms. Za jednu sekundu sa stav grafu vykreslí päťkrát. V simulácii máme dvanásť mravcov.

Výsledky

Správanie mravcov je veľmi rôzne v závislosti od nastavení parametrov. Niektoré nastavenia môžu viesť k úplne iným výsledkom. Pokúsil som sa nájsť riešenie pre rôzne úlohy. Grafy, nad ktorými som úlohy riešil, sú však veľmi malé (max. 10 uzlov). Nepokúšal som sa nájsť metódu na nájdenie optimálneho nastavenia parametrov.

Graf 1



V tomto grafe existuje iba jedna cesta a to $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$. Mravce veľmi rýchlo nájdu cestu. Po desiatich krokoch sa vykreslí cesta pre obchodného cestujúceho. Pri riešení sme použili parametre:

$$F_{local} = 1.1$$

$$F_{global} = 1.8$$

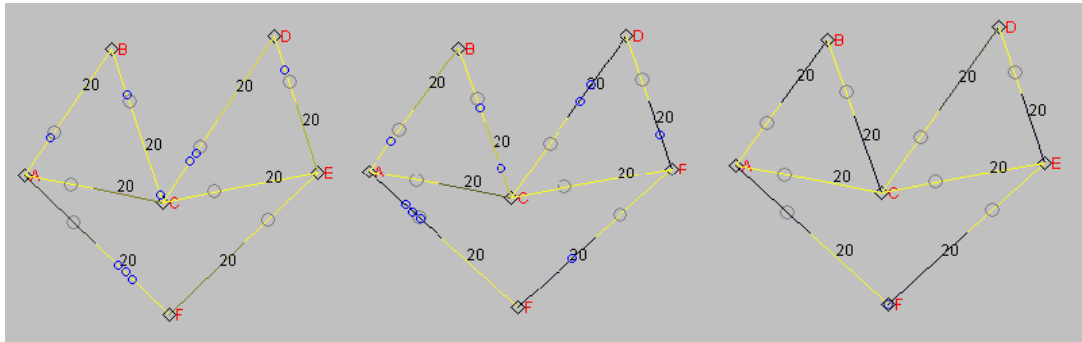
$$F_{loose} = 0.8$$

V prípade, že F_{global} nastavíme na 1.0 a mravce budú meniť hladinu feromónov iba lokálne, nájdu cestu obchodného cestujúceho iba o nejaký čas neskôr.

Hoci tento výsledok nie je prekvapujúci, ale stojí za povšimnutie, že hneď, čo jeden mravec našiel cestu, ostatné mravce už s väčšou pravdepodobnosťou vyberajú tú cestu alebo jej úseky. Úspešný mravec teda zvýši šance vybratej cesty.

Zaujímavejšie v tomto grafe však je, že v prípade čisto lokálnych zmien mravce nájdu cestu obchodného cestujúceho. Hoci namiesto slova „nájdu“ by sme skôr mohli použiť slovo „dohodnú sa“: na začiatku behu algoritmu sa postupne vytvoria cykly, resp. cesty (ďalej úseky) v grafe, a to tým, že mravce vytvoria orientáciu hranám a na daných úsekoch sa hýbu iba jedným smerom. Tieto úseky majú rôzne dĺžky. Úseky, ktoré sú dlhšie, majú väčšiu šancu na to, aby sa na nich vytvorili nové mravce v rámci znovuvytvárania mravcov, ktoré už doputovali. Mravce pohybujúce sa na úsekoch, sa dostanú na jej hranicu alebo prejdú celý cyklus a už si nemôžu vybrať uzol z úseku. Teda mravec si vyberie jednu z hrán pri hranici úseku, tým zvýši úroveň feromónov na tej strane vybratej hrany, ktorej sa úsek dotýka. Do hry sa dostane aj priechodnosť úseku, t.j. za aký čas vie mravec prejsť úsek. Úseky, ktoré sú príliš drahé, menej často umožňujú mravcom dostať sa na svoju hranicu, teda

sú v nevýhode. Úseky, ktoré sú dlhšie a lacnejšie, častejšie vedia zvýšiť hladinu feromónov na svojej hranici, pomaly a potom čoraz rýchlejšie „dobývajú“ ostatné úseky.



Postupná dohoda medzi mravcami

Graf 2

Oproti grafu 1 v tomto grafe sú len cesty, ktoré prechádzajú cez všetky uzly. Globálne zvýšenie feromónov tu menej zvýhodní vybratú cestu. Je otázne, či je algoritmus schopný nájsť najkratší traverz

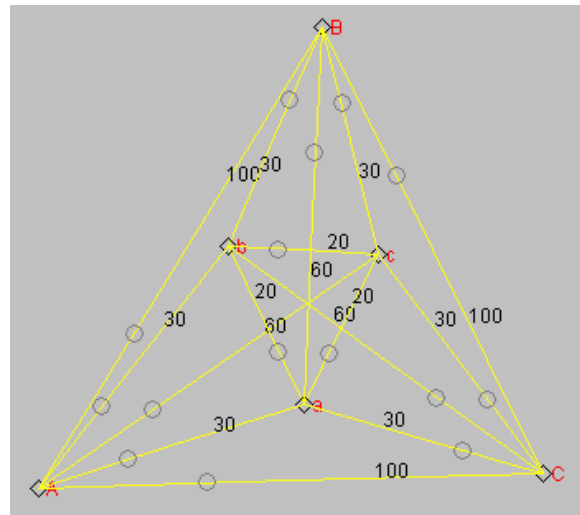
$a \rightarrow A \rightarrow b \rightarrow B \rightarrow c \rightarrow C \rightarrow a$.

Nastavenie parametrov:

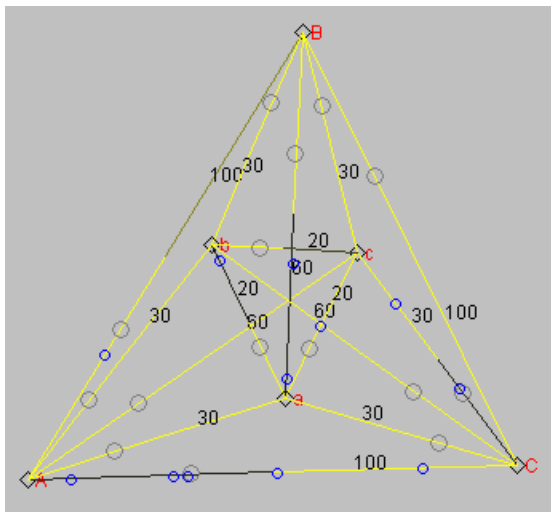
$$F_{local} = 1.96$$

$$F_{global} = 1.0$$

$$F_{loose} = 0.86$$



Algoritmus sa veľmi rýchlo uchýlil do lokálneho minima $A \rightarrow C \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow B \rightarrow A$, z ktorého sa už ťažko dostane. Globálne zvyšovanie nám môže pomôcť iba na začiatku algoritmu, keď „rýchle mravce“ môžu nájsť lepšie riešenie.



Pre tento graf je najväčším problémom uchýlenie sa do lokálneho minima. Možné spôsoby vylepšenia algoritmu môžu byť zavedenie elitizmu, alebo objaviteľov, čo však je riešenie, ktoré sa vzdiali od pôvodného princípu, ktorý skúmame. Zavedenie objaviteľov, ktorí sa neriadia feromónom, by nám určite pomohlo. Ale priblížili by sme sa skôr náhodnému algoritmu, čo môže slúžiť ako prezentačná pomôcka toho, že algoritmus problém rieši, ale nie toho, že je lepší aspoň v niečom ako ostatné.

Na záver k mraveniskovým algoritmom

V predchádzajúcom sa ukázalo, že náš algoritmus má isté nedostatky, s ktorými sa ťažko vysporiadame. Môžu nás možno napadnúť riešenia, ktoré sa používajú v iných stochastických algoritmoch na vyskočenie z lokálneho minima. Ich použitie však iba dokazuje, že metóda je iba ďalšia čiastočne úspešná, niekedy neúspešná, ale neprináša žiadny nový, kvalitatívne odlišný prístup. Preto sa pokúsim aspoň o formalizovanie niektorých pojmov.

Mraveniskové algoritmy riešia problémy na grafoch $G = (V, E, l)$, kde l je funkcia $l: E \rightarrow R^+$, definuje dĺžku hrán. V našom modeli sme uvažovali hrany, ktoré majú dve strany. Preto zavedieme množinu $\vec{E} = \{\vec{e} \mid e \in E\} \cup \{\bar{e} \mid e \in E\}$ a funkciu $h: V \times E \rightarrow \vec{E} \cup \{nil\}$, ktorá je definovaná nasledovne:

- Ak pre uzol v a hranu e existuje uzol u , pre ktorú platí $uv = e$, potom $h(v, e) = \vec{e}$ a $h(u, e) = \bar{e}$
- Ak taký uzol neexistuje, tak $h(v, e) = nil$

Mravec nachádzajúci sa na ľubovoľnom uzle v grafu G sa rozhodne pre jednu hranu, vychádzajúcu z uzlu v podľa úrovne feromónov. Ak sa úroveň feromónu na jednej z týchto hrán zvýši, tým sa zníži pravdepodobnosť výberu ostatných hrán. Teda úroveň feromónov je relatívna. Zavedieme funkciu $f: \vec{E} \rightarrow \langle 0; 1 \rangle$, ktorá nám určuje hladinu feromónov, teda pravdepodobnosť výberu hrán. Pre funkciu f zrejme platí, že pre každý uzol platí súčet pravdepodobností hrán z \vec{E} je jedna¹. Na vyjadrenie tohto zavedieme pre každý uzol množinu $\vec{E}_v = \{\vec{e} \mid h(v, e) = \vec{e} \wedge e \in E\}$, je to množina hrán z \vec{E} , ktorá je z uzlom v incidentná podľa h . Teraz môžeme vyjadriť predpoklad pre f :

$$\forall v \in V \sum_{\vec{e} \in \vec{E}_v} f(\vec{e}) = 1$$

Ostatné vlastnosti sa dajú podobne modelovať ako tieto. Treba zaviesť vyparovanie feromónov, čo sa dá pochopiť ako funkcia funkcií z f , po vyparovaní sa rozptyl medzi hranami sa znižuje, teda mravce sa rozhodujú náhodnejšie.

Myslím si, že metóda riešenia kolóniou mravcov sa dá vylepšiť iba dôkladnejšou analýzou.

¹ Pre každú hranu z \vec{E} existuje práve jeden uzol z V , teda každá hrana sa zarába do súčtu iba raz