

Debreceni Egyetem
Informatikai Kar

Optimális megoldáskeresés rajintelligencia módszerekkel

Témavezető:

Kósa Márk

egyetemi tanársegéd

Készítette:

Petróczki Imre

programtervező informatikus

Debrecen

2010

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK.....	2
BEVEZETÉS	3
I. A RAJINTELLIGENCIA BIOLÓGIAI HÁTTERE	4
1.1 ÉLELEMSZERZÉS	4
1.2 A LAKÓHELY KIVÁLASZTÁSA	9
II. SZIMULÁCIÓK	15
2.1 A MÉHEK ÉLELEMSZERZÉSE	15
2.2 A HANGYÁK ÉLELEMSZERZÉSE	22
III. AZ UTAZÓ ÜGYNÖK PROBLÉMA MEGOLDÁSA ACO ALGORITMUSOKKAL	27
3.1 BEVEZETÉS	27
3.2 AZ UTAZÓ ÜGYNÖK PROBLÉMA	27
3.3 ACO ALGORITMUSOK ALKALMAZÁSA AZ UTAZÓ ÜGYNÖK PROBLÉMÁRA	28
IV. SAJÁT PROGRAM BEMUTATÁSA	34
4.1 LEÍRÁS, ALGORITMUS	34
4.2 A PROGRAM MŰKÖDÉSE	34
4.3 MEGFIGYELÉSEK	36

Bevezetés

A rajntelligencia egy modern mesterséges intelligencia tudományág, amely multiágens rendszerek tervezését végző alkalmazásokkal foglalkozik, például az optimalizáció és a robotika területén. Ezen rendszerek tervezési paradigmája alapvetően különbözik más hagyományos megközelítésektől.

A rajntelligencia – a rendszer egész viselkedését irányító mesterséges, kifinomult vezérlők helyett – alapvetően sok természetes, nem kifinomult entitáson alapszik, melyek egy kívánt viselkedés bemutatásának érdekében együttműködnek. Ezen rendszerek tervezéséhez ihletet meríthetünk társas rovarok, például hangyák, termeszek, méhek és darazsak együttes viselkedéséből, valamint egyéb állatközösségek, például madár- és halrajok viselkedéséből. A társas rovarok kolóniái már évek óta a kutatók érdeklődésének középpontjában állnak. Mégis hosszú évek óta ismeretlenek azok az alapelvek, melyek viselkedésüket irányítják. Annak ellenére, hogy ezen közösségek tagjai nem túl kifinomult egyedek, együttműködve társaikkal, képesek összetett feladatok megoldására. A koordinált viselkedés az egyedek közötti, viszonylag egyszerű hatásokban és ellenhatásokban nyilvánul meg.

Például a hangyák, a termeszek és a darazsak, együttműködve képesek egy remekbe szabott fészket építeni, anélkül, hogy bármelyiküknek is lenne egy teljes elkészítési terve ennek végrehajtására. Másik példa a hangyák és a méhek élelemkeresési viselkedése. Míg a hangyák feromonösvényeken alapuló, közvetett kommunikációs stratégiát alkalmaznak a boly és az élelemforrás közötti legrövidebb út megtalálásához, addig a méheknél a leggazdagabb élelemforrás megtalálása a felderítő méhek munkáján alapszik, akik egy úgynevezett riszáló tánc segítségével közölnék információt egy újonnan feltárt élelemforrásról.

A tudósok alkalmazták ezeket az elveket új szemléletekben, például az optimalizáció és a robotvezérlés területén. Az ezen elvek alapján készült rendszereket a robosztusság és a rugalmasság jellemzi. Az önszervező és decentralizált rendszerekben történő együttes viselkedéssel foglalkozó kutatási terület a rajntelligencia.

Szakdolgozatomban célul tűztem ki ennek a területnek és informatikai felhasználásának bemutatását. Ezen kívül egy programot is készítek, mely implementálni fog egy rajntelligencián alapuló heurisztikát.

I. A rajintelligencia biológiai háttere

A társas hajlam fejlődése során – az a jelenség, amikor egyedek élnek együtt egy fészekben, mint például a hangyák, termeszek, valamint a méhek és a darazsak többsége – kialakult a csoport tagjai közötti információátvitel szükségessége. Már egyik egyed sem viselkedhetett úgy, mintha magányos egyed lenne, hanem egy finomra hangolt szerkezet tagjaivá kellett válniuk, annak érdekében, hogy alkalmazkodó viselkedést érjenek el az egész csoport szintjén. A rovarkolóniáknak sok közös döntést kell hozniuk, például: honnan gyűjtsenek élelmet, melyik új fészekbe költözzenek, mikor szaporodjanak, és hogyan osszák fel a szükséges feladatokat a rendelkezésre álló munkaerők között. Mostanára köztudottá vált, hogy a csoportszintű döntéseket a rovar egyedek információszerezése eredményezi, melyeket a társaiktól, vagy a közvetlen környezetükből gyűjtenek be. Más szóval, a rovar társadalmakban a döntéshozás nem központosított folyamat.

1.1 Élelemszerzés

Az élelemszerzés megszervezésének érdekében, a társas rovaroknak rekrutálásra van szükségük. A rekrutálás egy olyan viselkedést jelent, mely során egy bizonyos helyen az egyedek száma megnövekszik és ez lehetővé teszi a rovar társadalmak számára, hogy hatékonyan gyűjtsenek élelmet olyan környezetben is, ahol az élelemforrások túl nagy méretűek ahhoz, hogy egyetlen egyed kiaknázza őket, vagy foltokban szétszórva helyezkednek el. Továbbá, azok a rovar társadalmak, melyek információt közölnek a gazdag lelőhelyek elhelyezkedéséről, nagyobb mértékben tudják kiaknázni azt, mint azok, akik nem rendelkeznek ezzel a kifinomult rekrutálási mechanizmussal. Legjobb példa erre a méhek. A különleges táncnyelvük segítségével, akár 10 kilométer távolságban lévő forrásokból is tudnak gyűjteni nektárt.

A precíz rekrutálási mechanizmusok változatosan fordulnak elő a társas rovarok körében, de ennek ellenére be tudjuk sorolni őket két osztályba: direkt és indirekt mechanizmusok. Egy vegyi ösvényen keresztüli rekrutálás jó példa az indirekt rekrutálásra. A rekrutáló és a rekrutált között nincs fizikai kontaktus. Ehelyett kommunikálnak egymással, a környezetük változtatásával: ez az ösvény. A rekrutáló, mikor visszafelé jön egy gazdag élelemforrástól, feromont rak le útközben, és az újonnan rekrutált egyed egyszerűen követi ezt az ösvényt. Valamilyen módon hasonlít ez a rekrutálási mechanizmus, az üzenetszóráshoz: egyszerűen

kitesszük az információt, anélkül, hogy befolyásolnánk, hogy ki kapja meg. A másik véglet a „szájról szájra” terjedő információ átvitel: a direkt rekrutálás. A legismertebb példa erre a méhek táncnyelve.

A számítógép-tudósok között ismert a dupla híd kísérlet, ami egy példa arra, hogy a hangyakolónia hogyan szervezi meg az élelemszerzést. Ebben a kísérletben a hangyáknak két egyenlő élelemforrást helyeztek el, két ösvény végén, melyek különböző hosszúak voltak. Egy idő múlva a hangyák többsége a rövidebb út felé tartott. A legközelebbi élelemforrás megtalálása, egy pozitív visszacsatolási folyamat eredménye: ha a hangya élelmet talál, akkor a visszavezető úton egy feromon ösvényt hoz létre, majd a többi élelmet kereső hangya nagy valószínűséggel ezt az ösvényt fogja követni. Ez az ösvény követő viselkedés teszi lehetővé, hogy a kolónia kiválaszthassa a lehető legjobb élelemforrást, anélkül, hogy az egyes hangyák közvetlenül összehasonlítsák az egyes források minőségét. A hangyafajokon végzett kísérletek megmutatták, hogy a hangyák befolyásolják a kibocsátott feromon mennyiségét, az élelemforrás minőségétől függően. Minél jobb a minőség, annál több feromont bocsátanak ki, így nagyobb valószínűséggel fogja a többi hangya a legjobb forráshoz vezető ösvényt követni.

A feromonösvény mechanizmus sikere feltehetően, de részben legalábbis, a hangyáknak, a feromonösvényre adott nemlineáris visszacsatolásában rejlik, amiben a távolság, amit egy hangya követ, mielőtt elhagyná az ösvényt, a feromon-koncentráció telítettségének függvénye. Más szóval, annak a valószínűsége, hogy egy hangya követni fog egy ösvényt, függ az ösvény erősségétől /feromon-koncentrációban kifejezve/, de arra mindig van esély, hogy a hangyák elveszítik az ösvényt, annak erősségétől függetlenül. Mikor az élelemforrás nem végtelen kapacitású, akkor az ösvénykövető hangyák egy olyan forráshoz lesznek irányítva, amiből nem tudnak táplálékot szerezni. A kolónia bizonyos fokig megakad ennél a részben optimális megoldásnál és ebből kijutni csak néhány, bonyolultságot növelő réteg hozzáadásával tud. Ilyen réteg lehet például a „ne menj erre” jelzésű negatív feromon, vagy az egyéni memória, mellyel az egyed emlékszik arra, hogy egy bizonyos ösvényt követve nem fog találni semmit. A másik hátulütője annak, ha bíznak a feromonösvényekben, az hogy, nehéz versenyezni egy meglévő ösvénnyel, még akkor is, ha egy jobb élelemforrást találtak. Ha egy közepes forrást fedeztek fel először, akkor utána hiába találnak egy jobb minőségű forrást, ha már az első ösvény létrejött, akkor nem lesznek képesek egy másik, elég erős

ösvényt létesíteni, mellyel az újonnan felfedezett, jobb helyhez vonzanák a társaikat. Így a hangyák újra egy részben optimális megoldáshoz jutottak.

Az alapvetően különböző rekrutálási mechanizmusuk miatt, a méhek sosem akadnak meg egy részben optimális megoldásnál. Ez köszönhető a kifinomult táncnyelvüknek. A háziméhek a virágok hollétét gondosan kódolt tánc révén adják társaik tudtára. Amennyiben a táplálékforrás igen közel van a kaptárhoz, "körtáncot" járnak. Ez izgalomba hozza a többi méhet, amelyek kizúdulnak, és a kaptár közelében kutakodnak. Ebben még nincs semmi különös. Ám az már több mint különös, ami akkor játszódik le, mikor a táplálékforrás távol esik a kaptártól. Az ezt felfedező felderítő méhecske ilyenkor úgynevezett riszáló táncot jár, amelynek formája a tápláléknak mind az irányát, mind a távolságát közli a többiekkel. A riszáló táncot a kaptárban járnak a lép függőleges felszínén. A kaptárban sötét van, ezért a többi méh nem látja a táncolót. Megtapogatják, azon túl hallják is, mivel a táncoló méhecske előadását kis ritmikus sípoló hangokkal kíséri. A tánc nyolcast ír le, a közepén egyenes futással. Ennek az egyenes futásnak az iránya az, amely, egyfajta csavaros kód formájában, a táplálékforrás irányát közli.

Az egyenes futás nem mutat rá közvetlenül a táplálékra. Nem is tehetné, hiszen a táncot a lép függőleges felületén járnak, s a lép elhelyezkedése a táplálék lelőhelyétől függetlenül rögzített. A táplálékforrást viszont horizontális síkban kell megtalálni. A függőleges lép leginkább egy falra tűzött térképhez hasonlítható. A térképen meghúzott vonal nem mutat rá közvetlenül a kijelölt úticélra, egyezményes megállapodás szerint mégis leolvashatjuk a térképről az irányt.

A méhek által használt egyezményes jelek megértéséhez tudnunk kell, hogy sok más rovarhoz hasonlóan a Nap segítségével tájolóják be magukat. Magunk is így cselekszünk, csak kevésbé pontosan. E módszernek két hátulütője is van. Az első, hogy a Nap gyakran elbújik a felhők mögé. A méhek egy olyan érzékszervük segítségével oldják meg ez a problémát, amivel mi nem rendelkezünk. Von Frisch volt az, aki felfedezte, hogy a fény polarizációjának iránya tájékoztatja őket a Nap helyzetéről akkor is, ha az maga nem látható. A második gond a Nap iránytűként való használatával az, hogy az idő múlásával „elmozdul” az égen. A méhek belső órájuk segítségével veszik ezt számításba. Von Frisch arra a szinte hihetetlen felfedezésre jutott, hogy a felderítő újtukat követően órák óta a kaptárba szorult táncoló méhek lassanként elfordítják az egyenes futás irányát, mintha ez a futás egyfajta óramutató volna. A Napot ugyan nem láthatják a kaptáron belül, mégis lassan változtatják táncuk irányát, hogy lépést

tartsanak a Nap mozgásával, amelyről belső órájuk révén szereznek tudomást. Érdekes módon a déli féltéke méhfajai ugyanezt fordítva művelik, ahogy el is várjuk tőlük.

Maga a táncnyelv egy érdekes és összetett nyelv. A lépen egyenesen felfelé mutató futás azt jelenti, hogy a táplálékforrás ugyanabban az irányban van, mint a Nap. Az egyenesen lefelé való futás az előbbivel pontosan ellentétes irányban lévő táplálékforrást jelez. Az átmeneti szögek mind azt jelentik, ami elvárható. Ötven fokkal a függőlegestől balra 50° -kal a Naptól balra való eltérést jelöl a vízszintes síkban. A tánc pontossága ennek ellenére nem igazodik a legközelebbi fokokhoz. Miért is tenné, hiszen önkényesen osztottuk fel az iránytűt 360° -ra. A méhek mintegy nyolc méhecske-fokra osztják fel. Voltaképpen magunk is nagyjából így cselekszünk, ha nem navigátorként tájékozódunk. Nyolc égtájat különböztetünk meg: észak, északkelet, kelet, délkelet, dél, délnyugat, nyugat, északnyugat.

A méhek tánca a táplálék távolságát is jelzi. Pontosabban, a tánc különböző vonatkozásai - a forgások és riszálás, valamint a sípolás sebessége - a táplálékforrás távolságával függnek össze, ezért bármelyikük vagy bármelyikük kombinációja segítségével a méhek tudomására jut a távolság. Minél közelebb van a táplálék, annál gyorsabb a tánc. A kaptár közelében táplálékra lelő méh érthetően izgatottabb, egyszersmind kevésbé is fáradt, mint a messze földről megtért méhecske.

Összefoglalva, egy felderítő méh jó táplálékforrásra akad. Visszatér a kaptárba nektárral és virágporral megrakottan, és terhet átadja a dolgozóknak. Azután táncolni kezd. Valahol a függőleges lépen, hogy pontosan hol, nem fontos, körbe-körbe futkos egy nyolcas szoros hurkait írván le. A többi dolgozó köréje sereglük, tapogatják és hallgatják. Számon tartják a forgások és talán a sípolás ütemét is. Felmérik, milyen szöget zár be a függőlegessel az egyenes futás iránya, miközben a táncoló a potrohát riszálja. Majd a gyűjtőméhek a kaptár kijárójához húzódnak, és kitörnek a sötétből a napsütésbe. Észlelik a Nap helyzetét - nem a magasságát, hanem hogy a vízszintes síkban miként tájolja be őket. Egyenes vonalban repülnek ki, amelynek Nappal bezárt szöge megfelel a tánc függőlegessel bezárt szögének a lépen. A csapat tovább repül ebbe az irányba, nem végtelen távolságra, hanem az általuk megtett táv (fordítottan) arányos a táncoló sípolása ütemével (pontosabban ennek logaritmusával). Érdekes, hogy amennyiben a felderítő méhecske eredetileg kerülőutat tett meg a táplálékforrás megtalálásához, táncának iránya nem e kerülő irányába, hanem a táplálék rekonstruált irányába mutat.

A legtöbb tanulmány, ami az élelmet gyűjtő egyedek elhelyezkedésével foglalkozik, stabil környezetet használ, amiben a táplálékforrások helye állandó. Mikor a feltételek állandóak, akkor a kolónia szerint az optimális megoldás az, ha kizárólag a legjobb forrásra fókuszálnak (biztosítva van, hogy ez a forrás akkora legyen, hogy határozatlan számú egyed gyűjthessen onnan) és pontosan ezt csinálja számos hangyafaj, melyek állandó forrásból gyűjtenek. Ilyen forrás például a mézharmat (levéltetvek által kiválasztott cukros anyag), vagy a levelek. Ezek a fajok hosszantartó ösvényeket hoznak létre, amik összekötik a bolyt az élelemforrással. Bizonyos fajoknál az ösvény tartóssága kisebb vagy nagyobb lehet, köszönhetően a dolgozók környezetformáló tevékenységének, mely során növényzetet távolítanak el. Azonban, mihelyst megváltoznak a feltételek, ez a természetben elég gyakori, fontossá válik, hogy legyen egy mechanizmus, mely segítségével váltani lehet másik forrásra vagy forrásokra, ha ezek gazdagabbak, mint az eddigiek, vagy a kezdeti forrás kifogyott. Ez azt jelenti, hogy a dinamikus változó környezethez való alkalmazkodás érdekében, a rovarkolóniáknak információt kellene tárolniuk az éppen kitermelés alatt álló forrásokról, de ezzel egy időben engedni új helyek felkutatását is. A kulcs, a változó feltételek nyomon követéséhez, a kiaknázás és a feltárás közötti információcserében van: a meglévő információk használata (kiaknázás), szemben az új információk gyűjteményével (feltárás). Hogyan teszi lehetővé a két rekrutálási mechanizmus – az ösvényalapú gyűjtés és a méhek táncnyelve – az új élelemforrások felfedezését? Amint említettem, az ösvénykövető hangyák esetén mindig van esélye annak, hogy elvesztik az ösvényt, függetlenül annak erősségétől. Ez azt eredményezi, hogy néhány hangya eltévedhet még akkor is, ha az ösvény legerősebb részén vannak. Feltételezve, hogy ezek az „elveszett” hangyák képesek felfedezni új élelemforrásokat, és így, a kolónia felderítőivé válni, akkor ez az ún. „hibák stratégiája” (Deneubourg et al. 1983; Jaffe and Deneubourg 1992) lehetővé teszi, hogy kolónia finomra hangolja a felderítők számát, a már kiaknázott forrás jövedelmezőségétől függően. Ez azért van, mert minél gyengébb az ösvény (ezáltal közepes táplálékforrást jelölve), annál nagyobb számú hangya „tévedhet el” és így, felderítővé válhat. Mikor az ösvény erős (ezáltal magas minőségű forrást jelöl), akkor kisebb számú hangya tér le az ösvényről, ami felderítők kisebb számát eredményezi.

A felderítők szabályozása a méhek esetén hasonlóan biztosítja az egyensúlyt, a kiaknázás és a feltárás területén elhelyezett egyedek számában. Egy munkanélküli gyűjtőgető egyed, (aki akar gyűjteni, de nem tudja honnan) először táncoló egyedet próbál keresni, akinek a táncát

majd tudja követni. Ha ez nem sikerül neki, mert a táncolók száma alacsony, akkor elhagyja a kaptarat, keresgélni kezd a környező területeken, ezáltal felderítővé válik. Ennek eredményeképpen, a felderítők száma magas, a táncolók száma pedig alacsony lesz, míg a kolónia nem fedez fel sok jövedelmező területet. Ezzel szemben, ha a gyűjtögetés bőséges, akkor a felderítők száma alacsony, a táncolóké pedig magas lesz. Ez az ún. „bukott követő” mechanizmus biztosítja a kolónia számára, hogy gyorsan be tudja állítani a felderítőinek számát, a jövedelmező területekről rendelkezésre álló információk mennyiségétől függően. Még akkor is, ha a kolónia egy jövedelmező részt termel ki, lehet másik, felfedezetlen, kiaknázatlan, jövedelmezőbb terület. Mihelyst csökkenni kezd a táncolók száma a kolónián belül, megnövekszik a valószínűsége annak, hogy néhány munkanélküli gyűjtögető nem talál táncoló méhet, és így a kolónia kiküld néhány felderítőt. A táncolók számában ilyen ingadozás még akkor is lehet, ha sok a felderített élelem.

1.2 A lakóhely kiválasztása

Lenyűgöző, ahogyan a rovarkolóniák gyűjtik az élelmet, de ennél is lenyűgözőbb az, hogy ugyanazokat a kommunikációs mechanizmusokat gyakran különböző célok elérésére használják: az új lakóhely kiválasztására. Egy kolónia két esetben választ új otthont. Ha a régi fészek megsemmisült, akkor az egész kolónia költözik, vagy szaporodáskor, ha a régi kolónia már túl nagy és egy részének új fészekre van szüksége. Ilyenkor egy részük kirajzik egy vagy több királynővel és új kolóniát alapítanak. A rovarkolóniák hasonló kérdésekre keresik a választ, mint az emberek, mikor lakóhelyválasztás előtt állnak. Ilyen kérdések lehetnek például: mik a lehetséges lakhelyek, hogyan hasonlíthatjuk össze a tulajdonságaikat, összegyűjtöttük-e az szükséges információkat, vagy még van több. Az lakóhelyválasztás a társas rovarok esetében még bonyolultabb, mivel lényeges, hogy a kolónia döntése egyhangú legyen. A döntésképtelenség és az egyet nem értés végzetes lehet. A lakóhelykeresést két társas rovarfajnál vizsgálták részletesebben: a hangyáknál és a méheknél. A *Temnothorax albipennis* hangyafaj kis kolóniákat hoz létre (kb. 100 dolgozó) és sziklarepedésekben él. A laboratóriumban könnyen el lehet helyezni őket. Lerombolva régi otthonukat, rá lehet kényszeríteni őket, hogy válasszanak egy újat. Továbbá, a kis kolóniaméret miatt, nem nehéz egyénileg megjelölni az összes egyedet, ami elősegíti a viselkedésük tanulmányozását.

A méhek esetében sokkal több egyed van (kb. 15 ezer), de a kutatók gyakran csak 4-5 ezres rajokkal dolgoznak. A méhek esetén nagy előnyt jelent az, hogy egyszerűen a királynőt kiemelve rábírhadjuk a méheket, hogy egy új rajt hozzanak létre. És, ha szükséges, akkor meg is címkézhetjük őket egyénileg.

Az ily módon hajléktalanná tett rovarok számára, különböző minőségű fészkek felkínálása révén, megvizsgálhatjuk, hogy a hangyák és a méhek milyen tulajdonságokat vesznek figyelembe az új otthon keresése közben. Ezzel egy időben, tiszta képet kapunk a közös lakóhelykeresés alapját képező viselkedésekről. Ezek felhasználhatóak később, hogy megalkossunk egy egyénalapú modellt, mely segítségével megérthetjük, hogy az egyéni tettek hogyan eredményeznek egy kollektív döntést.

1.2.1 Lakóhelykeresés a méheknél

Tom Seeley volt az első aki módszeresen tanulmányozta a társas rovarok lakóhelykeresését. A modelljében méheket használt. Seeley annak a meghatározásával kezdte, hogy a méhek milyen tulajdonságokat vesznek figyelembe, mikor döntenek egy lehetséges új hely alkalmasságáról. Mivel egy olyan szigeten dolgozott, ahol nem voltak fák (ez a faj alapvetően faüregekben él, de ember alkotta kasban is megélnek, ha nincs rendelkezésre álló fa), ezért Seeley és kollégája Buhrman manipulálhatták a helyek jellegét, amik közül a méhek választani fognak. A helyek fő jellemzőinek változtatásával, mint például: a bejárat nagysága és befogadóképessége, meg tudták határozni, hogy a méhek szemszögéből mi számít közepes és kiváló lakóhelynek. Továbbá, ez lehetőséget adott nekik, hogy tanulmányozzák, az egyes méhrajok mennyire jók a lehetséges kasok közül, a legjobb kiválasztásában. És nem meglepő módon, a méhek nagyon jók ebben. Ugyanis, mikor fel volt nekik kínálva 5 kas, amiből 4 közepes minőségű volt a túl kicsi mérete miatt (a méhek alapvetően a nagy kast szeretik, kis bejárat), ötből négyszer a méhek a legjobb kast választották ki.

A méhek, amikor találnak egy alkalmas kas helyet, visszatérve táncot adnak elő. Ezeket lefilmezve, Seeley és Buhrman tanulmányozni tudták, hogy miben különbözik a tánc, ha a méh egy közepes, vagy egy kiváló helyről tért vissza. Megfigyelték, hogy a méhek 3 féle módon hangolják a táncukat. Először, a kiváló helyről érkező méhek tánca tovább tart, mint a

közepes helyről visszaérkezőeké. Másodszor, a kiváló helyet jelölő tánc több riszáló fázist tartalmaz (a tánc ezen része kódolja a távolságot). Végül, a kiváló helyet jelölő tánc élénkebb, ami azt jelenti, hogy két riszáló fázis között kisebb az eltelt idő. Így, van egy jól látható különbség a táncbéli viselkedésben, mikor egy közepes és egy kiváló helyről tér vissza a méh. Ez a tánc nem különbözik attól a táncától, amit élelem találásakor mutatnak be a méhek. Azonban az élelmet mutató táncok sohasem lesznek összhangban, mert mindig lesznek olyan helyek melyeket egyszerre reklámoznak. Azonban, a méhrajnak új otthon választásakor egy helyet kell választani egyhangúan és ezért a táncoknak összhangban kell lenniük.

A felderítő méhek azok, akik átfésülik a környezetet megfelelő új kast keresve, kirepülnek minden irányba, és információkkal térnek vissza a talált helyekről. Kezdetben, rengeteg tánc folyik a kasban, reklámozva az elég jónak talált helyeket. Pár órán belül, azonban, sok helyért már nem táncol egy méh sem, és közvetlenül az előtt, hogy a méhraj felszállna és elindulna új otthonába, a legtöbb méh ugyanazt a helyet mutatja a táncával. Egyhangú döntés született anélkül, hogy a felderítők összehasonlították volna a különböző helyeket, vagy a többi táncot követő méh kiválasztotta volna a legjobb helyet mutató táncot. A legvalószínűbb ok, amiért a méhraj ki tudja választani legtöbbször a legjobb helyet, az a tánc „elkopása”. Mikor egy élelemforrás miatt táncolnak a méhek, akkor azt folyamatosan teszik, míg a forrás jövedelmező marad. Ezzel szemben új otthon kutatásakor végül abbahagyják a táncot a méhek, még akkor is, ha az új hely kiváló minőségű.

A folyamat így módon megy. A méh, amely egy kiváló helyről tért vissza, táncol, mondjuk száz riszáló fázist az első tánca alatt. Ezután befejezi és visszatér a felfedezett helyhez és meggyőződik, hogy még mindig kiváló-e. A kasba visszatérve, megint elkezd táncolni, de a riszáló fázisok számát lecsökkenti nyolcvanra. Ezután újra visszarepül, és a folyamat ismétli magát. Ez azt jelenti, hogy öt oda-vissza repülés után a méh nem fog táncolni (mivel minden visszatéréskor csökkentette a riszáló fázisok számát), de időközben már előadott elnyújtott és élénk táncokat, az általa talált hely választásának érdekében. Ezt hasonlítsuk össze egy olyan esettel, mikor a méh közepes helyet talál. A méh, mondjuk csak hatvan riszáló fázist táncol az első tánca alatt, negyvenet a második alatt és így tovább, míg megszűnik a tánca teljesen. Amellett, hogy kevesebb ideig tart a tánca, még kevesebb alkalma is van táncolni, mint annak a méhnek, aki a kiváló minőségű helyet találta. Így a „reklámozás” hossza látványosan

különbözik a kiváló és a közepes helyek esetében, aminek az eredménye az, hogy több méhet sikerül toborozni a kiváló helyhez, mint a közepes helyhez, és ezek a méhek, feltéve, hogy ők is kiválónak találják a helyet, hosszan fognak táncolni, és sok méhet fognak toborozni. Ez azt sugallja, egy matematikai modell alapján, hogy a tánc „kopása” döntő fontosságú abban, hogy a méhraj el tudja dönteni, melyik hely legyen az új otthona. De ez a feltevés még gyakorlatban való tesztelést igényel.

1.2.3 Költözködő hangyák

A *Temnothorax albipennis* hangyafaj eléggé különbözik a méhektől. Nemcsak abban, hogy kisebb kolóniákban élnek, hanem abban is, hogy a döntéshozatal jobban függ az egyén döntésétől. Például, amikor felkínálták a választást két fészek között, akkor körülbelül a hangyák fele közvetlenül összehasonlította a két fészek minőségét, és ez alapján hoztak döntést. Ugyanekkor, azonban, a hangyák másik fele nem hasonlította össze közvetlenül a különböző lehetőségeket, mégis hozzájárultak a kolónia döntésének meghozatalához. Feltehetjük a kérdést, hogy hogyan működhet a döntéshozó mechanizmusuk.

Az *T. albipennis* egyedek fészekválasztási viselkedését már részletesen feltárták. A *T. albipennis* egyedek nem használnak feromonösvényeket társaik toborzásához, ehelyett megbíznak a tandemfutásban, mikor az egyik egyed vezeti a másikat azáltal, hogy szoros érintkezésben maradnak, és a szociális szállításban (social carrying), mikor a toborzó egyszerűen felveszi a másikat és elviszi az új fészekhez (a királynőt is mindig így viszik). A tandemfutás lényege, hogy amikor egy hangya eledelre bukkan, vezető szerepet vesz föl, és megmutatja egy társának az élelemforráshoz vezető utat. A két hangya szorosan egymás mögött halad, és aktív kommunikáció zajlik közöttük a „menetelés” során. A futás kezdetén a vezetőhangya egy be nem avatott fajtársat keres a bolyban, aki hajlandó követni őt az élelemforráshoz. A tandemfutás valójában igen lassú mozgás, mert a „követő” hangyának időről időre meg kell állnia, hogy körülnézzen és megjegyezze azokat az útjelzőket, melyek alapján emlékezni fog az útra. Miután a követőhangya ezt megtette, csápjával megütögeti az előtte haladó vezetőnek a hátsó lábát és potrohát, így jelezve, hogy folytathatják az utat. A kutatók tüzetesen vizsgálták a hangyák mozgását a tandemfutás közben, és egyértelműen megfigyelhető volt a kölcsönös visszajelzések rendszere. Amikor megnőtt a két hangya

közötti távolság, a vezető lassított, a követő pedig megszaporozta a lépteit; amikor pedig csökkent a köztük lévő távolság, a vezető gyorsított, így diktálva az iramot. A vezetők igencsak megfizetik az út árát, mert a „tanítvány” nélkül körülbelül négyszer olyan gyorsan elérnék a táplálékhoz. A tanításból származó hasznot a tanítvány aratja le, mert így sokkal gyorsabban elér a forráshoz, mintha egyedül kellett volna megkeresnie az utat. Miután sikeresen megtanulta a leckét, ő maga is tanítóvá válhat, így az egész boly számára hasznos információ igen gyorsan eléri a kolónia összes tagját.

A folyamat kezdetén, mikor a felderítők felfedeznek egy új lehetséges fészket, még csak tandemfutás történik. A méhekhez hasonlóan, a *T. albipennis* felderítők is tudják, hogy mit keresnek egy új otthonban: legyen tágas és a bejárata legyen szűk, hogy könnyebben lehessen védeni. Annak a valószínűsége, hogy a felderítő tandemfutást kezdeményez a felfedezett fészkekhez, függ annak minőségétől. Továbbá, a kiértékelés időtartama (az új fészkek vizsgálatával töltött idő) fordítottan arányos az új fészkek minőségével. Ezért, minél jobbnak ítéli meg a felderítő a fészkek minőségét, annál hamarabb kezdi meg a toborzást. A felderítő egy egyedét elvezet az felfedezett fészkekhez, ezáltal megtanítja neki az odavezető utat, és ha a toborzott hangya valóban jó minőségűnek találja azt, akkor később ő is vezethet oda más hangyát. Ennek eredménye, hogy a jó minőségű helyen megnövekszik a hangyák száma, míg a kevésbé jó helyek nem vonzanak annyit. Mikor a hangyák száma egy fészkeknél meghalad egy bizonyos számot, nem indulnak új tandemek, ehelyett a régi fészkekben maradt hangyákat felveszik és egyszerűen elszállítják őket az új fészkekbe. A tojások és a lárvák is ugyanígy lesznek elszállítva. Feltehetjük a kérdést, hogy a *T. albipennis* egyedei miért alkalmaznak két féle toborzási módszert, egy lassút (tandemfutás) és egy gyorsat (szociális szállítás).

A tandemfutások időszakában, az újonnan felfedezett fészkek minőségének megítélése önállóan, függetlenül történik minden hangya esetében, akár felderítés útján, akár tandemfutás révén jutott el ahhoz. Ez biztosítja, hogy a hangyák „véleménye” a fészkek minőségéről egyesüljön, ezáltal növelve annak valószínűségét, hogy az a bizonyos fészkek megfelelő. Ugyanakkor, ha a hangyák összegyűlése egy felfedezett fészkeknél lassú, akkor az lehetőséget ad arra, hogy egy jobb fészket találjanak, ahol a toborzás gyorsabb lesz és így, a hangyák száma ugrásszerűen fog növekedni ott. Mivel a toborzás függ a fészkek minőségétől, ezért a jó minőségű helyeken hamarabb összegyűlik annyi hangya, hogy megkezdhessék a szociális

szállítást. Ez az utolsó fázis lehetőséget ad arra, hogy a kolónia gyorsan át tudjon költözni a választott fészekbe. (Emlékezzünk, hogy költözésre csak akkor kerül sor, ha a régi fészek elpusztult. Ilyenkor pedig fontos a gyorsaság.)

A Bristol Egyetemen is elvégeztek egy hasonló kísérletet. Dr. Elva Robinson, a Bristol Egyetem kutatója apró rádiófrekvenciás jeladókat szerelt hangyák hátára, hogy megvizsgálja, miként választanak új otthont maguknak. Az állatoknak két mesterséges bolyt építettek, a közelebbi gyengébb, a távolabbi jobb minőségű volt, a kutatók pedig érzékelők segítségével rögzítették, hányszor mennek át a hangyák az egyik bolyból a másikba. Robinson és kollégái emellett a tandemfutás gyakoriságát is vizsgálták.

A vizsgálat során a kutatók egy hosszú aréna végébe helyezték a hangyákat tartalmazó bolyt, ettől 30 centiméterre helyezkedett el a gyengébb fészek, 120 centiméterre a jobb minőségű. A két boly abban különbözött egymástól, hogy a közelebbinek átlátszó teteje volt, míg a távolabbira egy vörös szűrőt helyeztek, így azt a hangyák sötétnek érzékelték, s korábbi vizsgálatok során már kiderült, hogy a kísérletben részt vevő *Temnothorax albipennis* faj jobban kedveli a sötétebb fészkeket.

A hangyakolóniák 100-200 egyedből álltak, és mindegyik hangyát egyedi rádiófrekvenciás jeladóval látták el. Első lépésként az eredeti hangyabolyt lerombolták, majd a kihelyezett fészkeknél elhelyezett érzékelőkkel regisztrálták, melyik hangya lépett be és ki, valamint kézi leolvasókat használtak a tandemfutásban részt vevő hangyáknál, amint átlépték a felezővonalat a két boly között. Mindezt úgy, hogy ne zavarják meg a hangyákat a mozgásban.

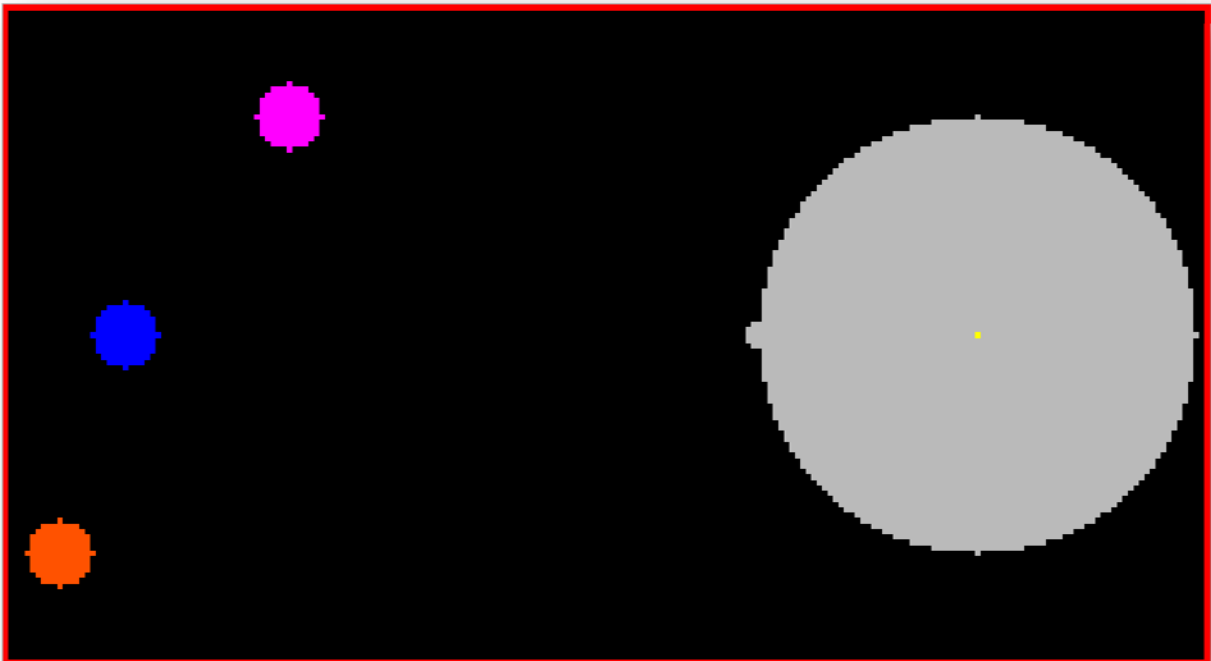
Összesen kilenc kolóniával végezték el a kísérletet; kevés hangya járt mindkét bolyban, kevésnek volt összehasonlítási alapja a választás előtt. Az elsőként a gyengébb bolyt látogató hangyáknak 41 százaléka döntött úgy, hogy inkább a távolit választja, míg az először távoli, jobb bolyba eljutó hangyáknak csupán 3 százaléka ment át a közelebbibe. A kolóniák közül végül négy a távoli (jó), három a közeli (rossz) fészket választotta, két kolónia pedig kettéoszlott a két fészek között. A kontrollvizsgálatokban a közeli és távoli boly ugyanolyan jó minőségű volt (mindkettő fölé vörös szűrőt tettek), és ebben az esetben a vizsgált 15 kolóniából 14 a közelebbi bolyt választotta.

II. Szimulációk

Thomas Schmickl, a Grazi Egyetem kutatója készített rajntelligenciával kapcsolatos szimulációkat, melyek közül a méhek és a hangyák élelemszerzésének szimulációját fogom bemutatni.

2.1 A méhek élelemszerzése

Ez a szimuláció bemutatja, hogy a méhek miképp választanak különböző nektárforrások közül. A kiinduló helyzetben a kép jobb oldalán látható a kaptár, melyben a méhek véletlenszerűen mozognak, valamint a nektárforrások.



Néhány méh elmegy felderítő útra, vagyis kirepül a kaptárból és véletlenszerűen repked. Egy ideig keresgél, de ha nem jár sikerrel, akkor visszatér a kaptárba. Viszont, ha talál élelemforrást, akkor nektárral megrakodva tér vissza otthonába, ahol táncolással mutatja meg az elég közel lévőnek a helyet, ahonnan hozta a nektárt. Ha egy méh megérti az információt, akkor ő is kirepül megkeresni a mutatott helyet. Ha sikerül neki és megtalálja, akkor nektárral tér vissza a méhkasba, ahol táncolásba kezd és a folyamat kezdődik előlről. Viszont, ha nem találja meg a nektárforrást, akkor egy ideig még keresi, körbe-körbe repül, majd visszatér a

kaptárba. Ott ha talál egy táncoló méhet, akkor elfelejti az eddig tanultakat és annak a táncát fogja követni.

2.1.1 Paraméterek, beállítások

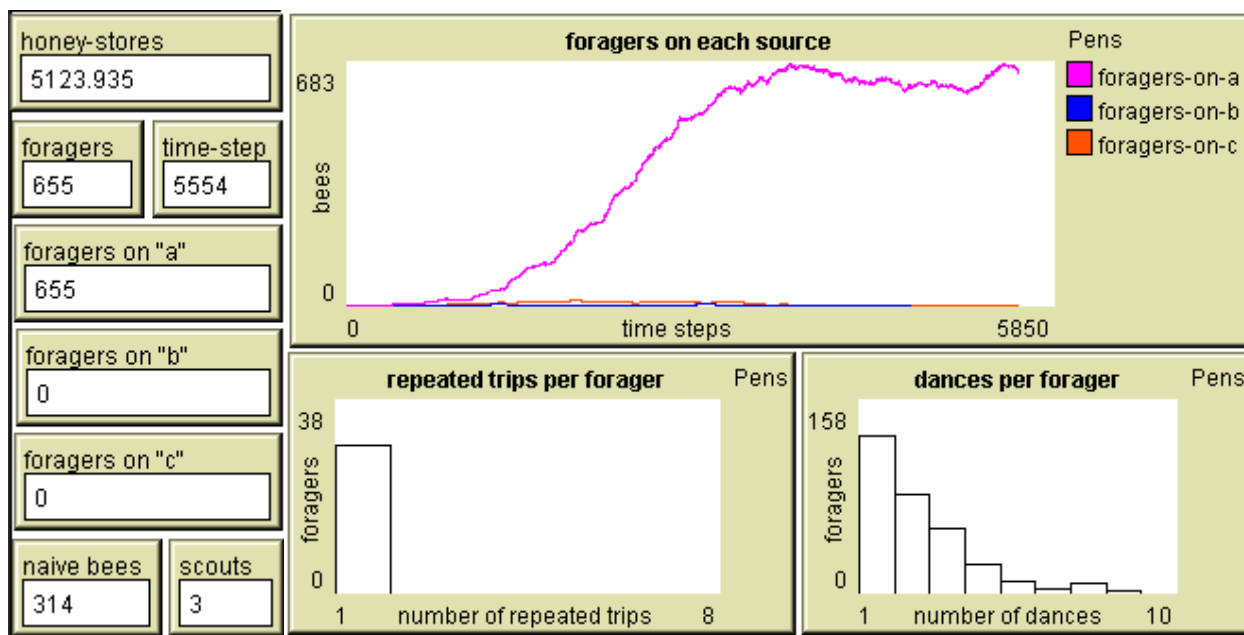
Csúszkák segítségével állíthatjuk be a környezet és az egyedek tulajdonságait:

- A három nektárforrás elhelyezkedése. X,Y koordinátákat állíthatunk.
- A nektárforrások cukorkoncentrációja.
- Annak a valószínűsége, hogy egy méh felderítővé válik.
- Annak a valószínűsége, hogy a méh elfelejti a nektárforrás helyét.
- Annak a valószínűsége, hogy a méh újra elmegy nektárért.
- A zaj nagysága, amely a tánc közbeni információátvitelt zavarja.
- Egy felderítő útjának maximális tartama.
- A kolónia nektáréhsége. Ha ez magas, akkor azonnal reagálnak egy táncra.
- A méhek száma.



A program visszajelzést is ad a felhasználó számára az alábbi adatokról:

- A kaptár nektártartaléka.
- Gyűjtőgető méhek száma összesen és nektárforrásonként.
- Felderítők száma.
- Se nem gyűjtőgető, se nem felderítő, ún. naív méhek száma.



2.1.2 A méhek állapotai és a szabályok

Minden egyed az alábbi állapotok valamelyikében van, ezáltal viselkedések egy halmazát követi. Ezek az állapotok az alábbiak:

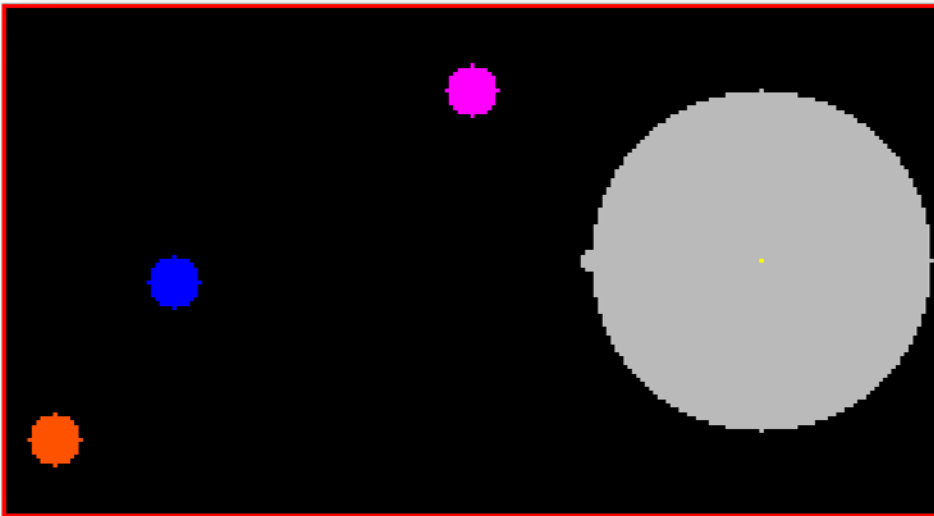
- **kaptárban lévő** (citromsárga): A kaptárban mozognak véletlenszerűen. Meghatározott valószínűséggel lehetnek felderítők, ekkor elhagyják a kaptárat. Ha sikeresen visszatér onnan akkor táncolásba kezd. Meghatározott valószínűséggel a méh elfelejti, hogy hol van a nektárforrás. Meghatározott valószínűséggel kirepül a legutóbbi nektárforráshoz, ahol járt és gyűjtőget újra. Ha találkozik egy táncoló méhvel, akkor elfogadja annak iránymutatását és elhagyja a kaptárat.
- **táncoló** (a mutatott nektárforrás színét ölti magára): A tánc akkor kezdődik, ha egy véletlen értékű változó az aktuális táncolási küszöb alá esik. A küszöb ezután 20%-kal

csökken. Minél közelebb volt a nektárforrás és minél magasabb volt a cukortartalma, annál magasabb a táncolási küszöb kezdőértéke. És a tánc időtartama is hosszabb akkor. A tánc alatt, a méh színe a mutatni kívánt forrás színét veszi fel, így meg tudjuk figyelni az információcserét a képernyőn. Ezeket az információkat begyűjthetik a „kaptárban lévő” állapotú méhek, ezt szabályozhatjuk a zajosság állításával. Miután a táncolási idő letelt, a méh visszatér „kaptárban lévő” állapotba, de az is lehet, hogy újra elkezd táncolni.

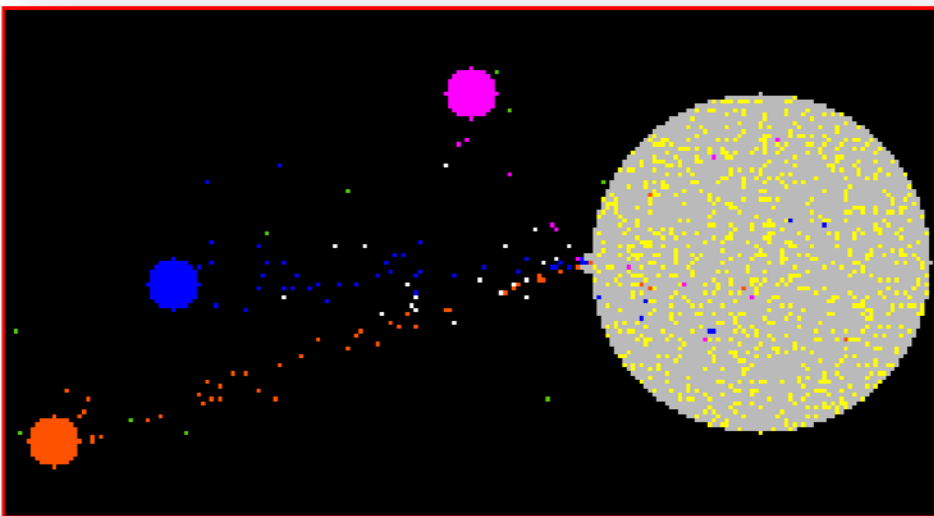
- **felderítő** (zöld): A méhek elhagyják a kaptárat és véletlenszerűen repülnek. Ha találnak egy élelemforrást, akkor felveszik annak színét és közvetlenül hazarepülnek („visszatérő” állapotba kerülnek). Meghatározott valószínűséggel abbahagyják a keresést és visszarepülnek (fehér színűek lesznek).
- **gyűjtögető** (annak forrásnak a színét veszi fel, amelyikből gyűjtött): A méh, amely sikeresen gyűjtögetett, felderített, vagy információt szerzett társa táncából, közvetlenül a nektárforráshoz repül. Az információi lehetnek hibásak (a zajosság miatt). Ha ott talál valamit, akkor „visszatérő” állapotra vált. Ha nem, akkor egy adott ideig még keresgél.
- **keresgélő** (az érintett forrás színét veszi fel): A méh keresi azt a forrást, amelyikről információi vannak, de nem találja. Körözéssel repül egy kis ideig, majd ha nem találta meg, akkor visszatér eredménytelenül (fehér színű lesz).
- **visszatérő** (az érintett forrás színét veszi fel, vagy fehérét): Ha a méh sikeresen visszatér a gyűjtögetésből, vagy a sikeres felderítésből, akkor az érintett nektárforrás színét veszi fel. Ha feladja a keresést, akkor fehér lesz. Mindkét esetben visszatér a kaptárhoz.

2.1.3 Kísérlet

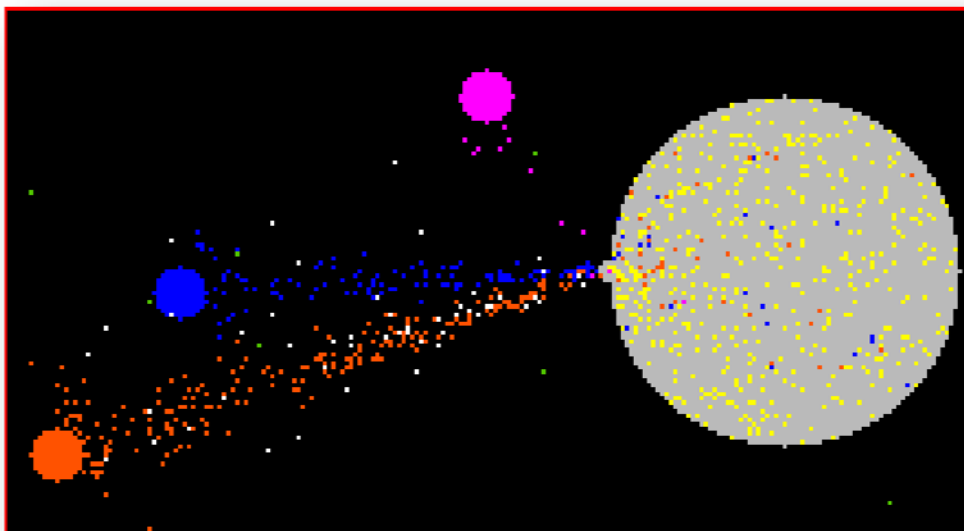
A programmal egy olyan helyzetet szimuláltam, mikor az egyes nektárforrások cukortartalma nagyon különböző. A kaptárhoz legközelebb került a rózsaszínű forrás, melynek cukortartalma 500 mikromol volt. Közepes távolságban helyeztem el a kék forrást, melynek cukortartalma a rózsaszín háromszorosa volt, azaz 1500 mikromol. A legtávolabb a piros forrás került, mely a maximális cukortartalmat kapta, ami 2500 mikromol. A méhek száma 1000 volt a kísérletben.



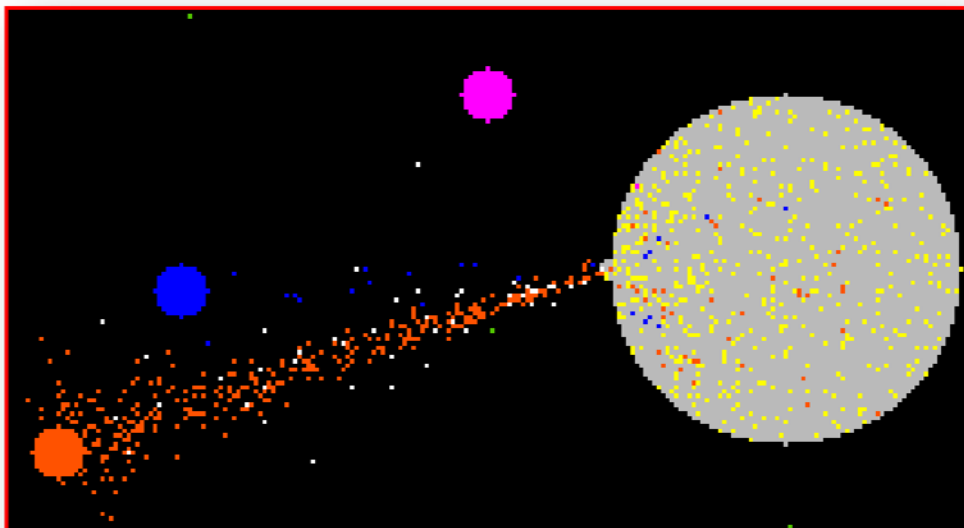
2000 lépés megtétele után látható, hogy a méhek mindegyik helyet felfedezték és gyűjtögetnek is róluk nektárt. Ekkor kevés méh vesz még részt a gyűjtögetésben, de az már most is látható, hogy a rózsaszín forrást kevésbé kedvelik, mint a másik kettőt, ahol körülbelül ugyanannyi méh van.



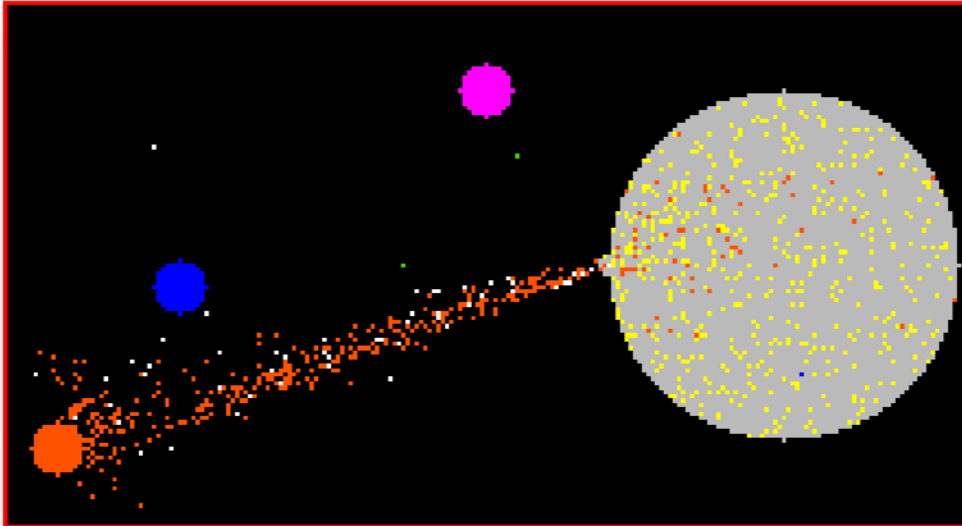
3000 lépés után már egyre több méh kapcsolódik be a gyűjtésbe. A piros forráson vannak a legtöbbben, a kéken is csak egy kicsivel vannak kevesebben, viszont a rózsaszínen alig gyűjtöget pár méh.



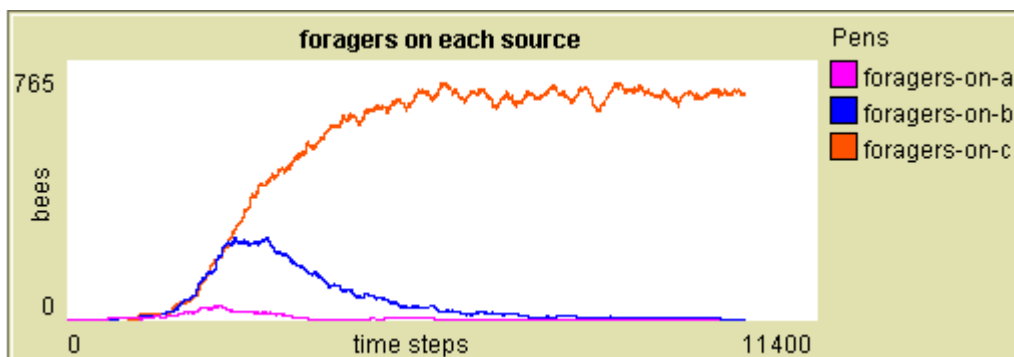
5000 lépés után már láthatóak a tendenciák. A rózsaszín forrás kihalt, a kéken pár méh gyűjtöget csak, a piros pedig megsokszorozta gyűjtőitőinek számát.



10000 lépés után beáll egy állandó állapot. A rózsaszín és a kék forrás kihalt és csak néha téved arra egy felderítő. A piros nektárforrás pedig a fő táplálékforrássá vált, csak onnan gyűjtögetnek a méhek.



Grafikonon is megfigyelhetjük az egyes nektárforrásokhoz tartozó gyűjtögetők számát. Látható, hogy a rózsaszín forrás nem játszott meghatározó szerepet a silány cukortartalma miatt. A kísérlet kezdetén, a közeli helyzete miatt vonzott néhány méhet, de ez nem volt tartós. A kék forrás 3000 lépésig ugyanannyi gyűjtögetőt vonzott, mint a piros, ezután stagnált, majd lassan fogyni kezdett a méhek száma itt. A kezdeti fellendülés annak volt köszönhető, hogy háromszor jobb volt a minősége, mint a rózsaszín forrásnak és közelebb volt, mint a piros forrás. Ám, mikor a gyűjtögetők száma elért egy körülbelül maximális értéket, a méhek átpártoltak a sokkal jobb minőségűbb piros forrásra. Majd szép lassan az összes átment oda.



Ugyanilyen beállításokkal, többször is elvégeztem a kísérletet, és azt figyeltem meg, hogy a kísérletek vége mindig ugyanaz: csak a piros nektárforrásból gyűjtenek a méhek. Ez az állapot valamikor hamarabb (6000 lépés után), valamikor később (11000 lépés után), de mindig bekövetkezett. Ez a programban szereplő véletlen változók miatt van. Például, ha az elején a felderítések csak későn jutnak el a piros forráshoz, akkor több idő szükséges, hogy az összes gyűjtögető méh áttérjen ide.

A szimuláció többszöri lefuttatása bebizonyította, hogy a méhek megtalálják az optimális megoldást, ebben az esetben a legnagyobb cukortartalommal rendelkező nektárforrást.

2.2 A hangyák élelemszerzése

Ez a szimuláció bemutatja, hogy a hangyák miként döntenek különböző élelemforrások között. A hangyák egyesével jönnek ki a bolyból és véletlenszerűen keresgélnek. Ha találnak élelemforrást, akkor az állapotuk „szállítóvá” válik. Felvesznek egy darab élelmet és visszamennek a bolyba. A visszafelé menő úton feromont helyeznek el, ezáltal felépül egy feromonösvény. A lerakott feromon az út időtartama alatt csökken, de legalább egy egységnyit mindig leraknak. Így a feromon az élelemforrás felé közeledve erősödik. Egy keresgélő hangya, ha feromonösvénybe ütközik, akkor befejezi a keresést és elindul azon felfele. A feromon a környezetben szétterjed, ami által az ösvény szélesebb lesz. A feromon párolog is, ezért a következő elhaladó hangyának helyre kell állítani az ösvényt, különben az megszűnik. Miután a hangya visszaért a bolyba és lerakta terhét, ismét véletlenszerűen kezd el keresgélni.

Egy másféle feromon van a bolyban elhelyezve nagy mennyiségben, mely arra szolgál, hogy a hangyák megtalálják a bolyt. Ez nagyon erősen szétterjed és jelzi a hazavezető utat az egész „világban”. Ez a mechanizmus az egyszerűség miatt lett választva, valójában a hangyák az alábbi szempontok alapján találják meg az otthonukat:

- a napfény polarizációjának irányát felhasználva
- emlékeznek a környezetre, tereptárgyakra
- számolják a lépéseket és számon tartják a kanyarodások szögét

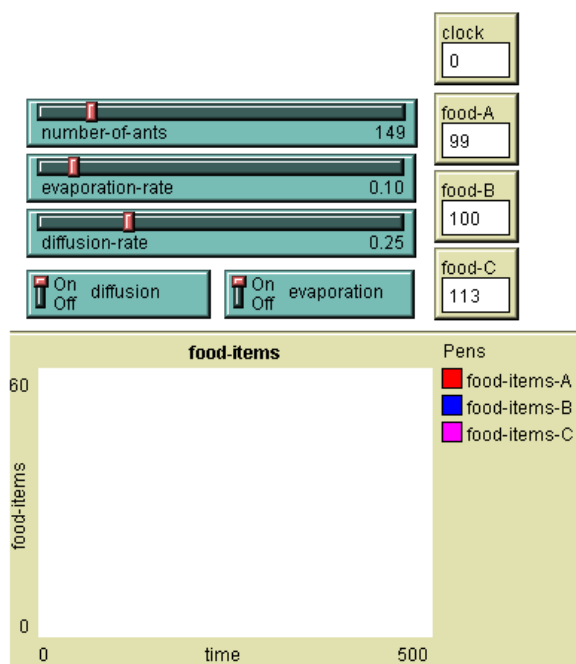
A párolgás és szétterjedés miatt verseny alakul ki az élelemforrások között a hangyákért. Mivel a hangyák száma korlátozott és az ösvényeknek szükségük van arra, hogy állandóan hangyák menjenek rajtuk és, így stabilak maradjanak. Minél közelebb van egy élelemforrás a bolyhoz, annál rövidebb lesz a feromonösvény és annál gyakrabban fognak rajta járni hangyák. Így egy pozitív visszacsatolási ciklus jön létre, mely által kiválasztják a legközelebbi élelemforrást.

Mivel a hangyák száma korlátozott, ezért az egyik forrásnál telítettség alakul ki, mert majdnem az összes hangya a legerősebb feromonösvényt követi. A többi ösvény nem maradhat stabil, mivel az a kevés hangya nem tudja fenntartani. De mihelyst elfogy az élelem a legközelebbi forrásból, az összes hangya szétszéled, és a verseny újrakezdődik a második legjobb élelemforrásért. Így a források hatékony sorrendben lesznek kiaknázva.

A valóságban, ha egy ösvényen túl sok feromon van, akkor az már nem vonz újabb hangyákat, ezáltal biztosítva azt, hogy a többi hangya kutathasson még több gazdag élelemforrás után. Ebben a szimulációban ez az effektus nem szerepel.

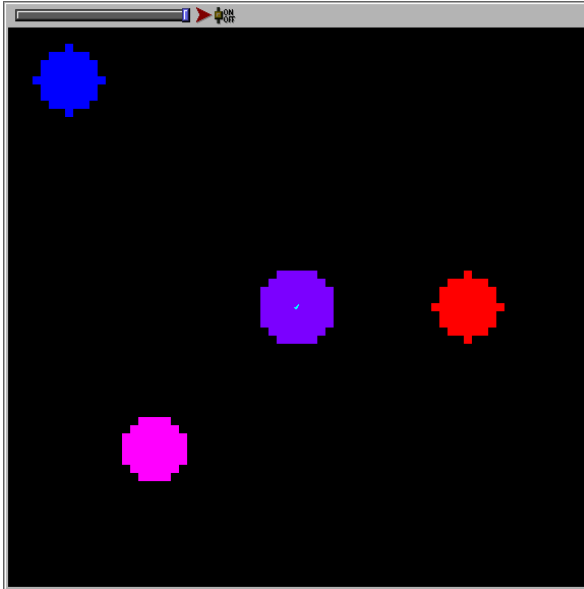
2.2.1 Paraméterek, beállítások

Lehetőségünk van beállítani a hangyák számát, a párolgás mértékét, valamint a feromon szétterjedésének mértékét. Visszajelzést kapunk az eltelt időről és az élelemforrások készletéről. Utóbbiról grafikusán is.

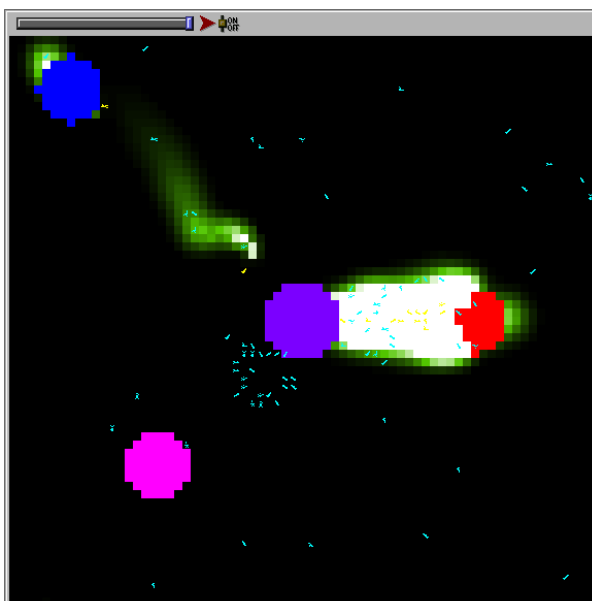


2.2.2 Kísérlet

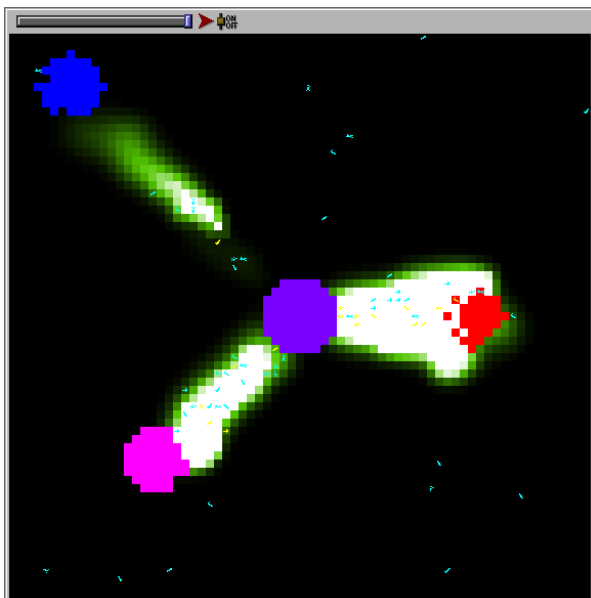
Három élelemforrás van elhelyezve a boly mellett: piros, rózsaszín és kék szín jelöli őket. Mindegyikben közel azonos mennyiségű táplálék van. A hangyák száma 149.



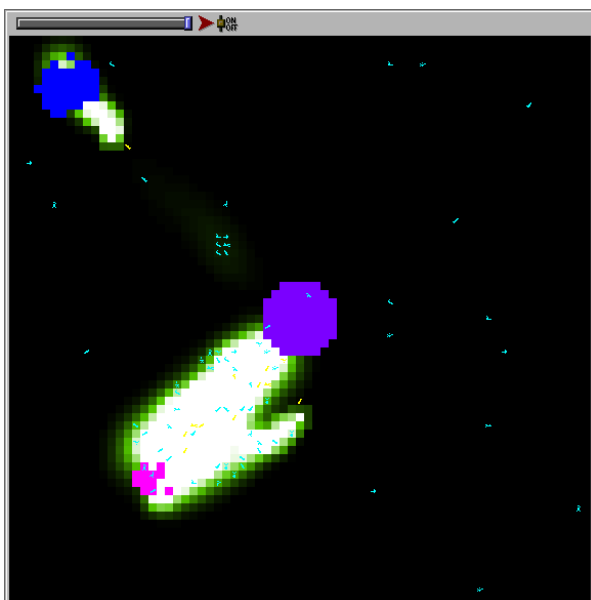
130 lépés megtétele után már látszik, hogy a hangyák megtalálták a legközelebb lévő piros színű élelemforrást és kitermelik azt. A feromonösvény zöld színnel látható. Ahol nagyon erős a koncentráció ott fehér a színe, és ahogy csökken a koncentráció, úgy lesz egyre sötétebb zöld. Itt már kialakult egy ösvény a piros forrás és a boly között és a kiterjedéséből látszik, hogy nagyon erős. A kék forrásnál is látszik egy kisebb feromonösvény, de az nagyon gyenge és idővel meg is szűnik.



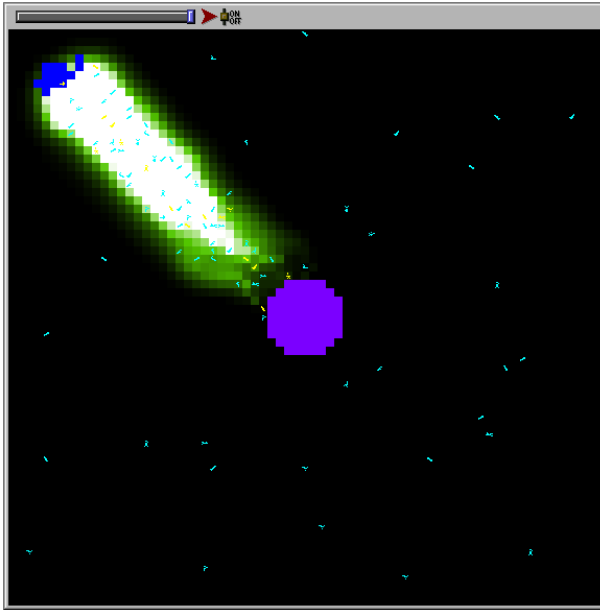
150 lépés után látható, hogy a piros forrás kitermelése még mindig folyik és a rózsaszín forráshoz is kiépült egy erős feromonösvény. Ez azért lehet, mert ez is közel van a bolyhoz és a hangyák száma nagy. A kék forráshoz továbbra sem tudott kialakulni ösvény.



500 lépés után a piros élelemforrás már kiürült és a rózsaszín vonzotta oda a hangyák nagy részét. A kék forrás még mindig kiaknázatlan.



900 lépés után már csak a kék forrás maradt, amihez kiépült egy erős feromonösvény.



A szimuláció során a hangyák optimális sorrendben aknázták ki az élelemforrásokat. Mindig a legközelebbiből gyűjtöttek.

További kísérleteket is elvégeztem, melyekben a feromon szétterjedését és párolgását megváltoztattam. Ezekben az esetekben is megtalálták a hangyák az optimális kiaknázási sorrendet, csak az időben volt különbség. Például, mikor a párolgást magas értékre állítottam, akkor csak nagyszámú hangya esetén jött létre erős feromonösvény. Így több időbe telt, míg kitermeltek minden forrást a hangyák.

III. Az utazó ügynök probléma megoldása ACO algoritmusokkal

3.1 Bevezetés

A hangya algoritmusok populáció alapú közelítések, melyeket sikeresen alkalmaztak több NP-nehéz kombinatorikus optimalizációs problémára. Ahogy a név is sugallja, a hangya algoritmusokat igazi hangyakolóniák viselkedése ihlette, legfőképp az élelemszerzési viselkedésük.

A hangyakolónia optimalizáció (Ant Colony Optimization – ACO) metaheurisztika kínál egyesített keretrendszert kombinatorikus optimalizálási problémákra a legtöbb hangya algoritmus alkalmazásnak. Az első ACO algoritmust, az Ant System-et (AS), alkalmazták az utazó ügynök problémára. Az Ant System-től kezdve, számos fejlesztés történt az alap algoritmuson. Ezeket az algoritmusokat, azután ismét tesztelték az utazó ügynök problémán. Az AS fejlesztései összességében jobb megoldásokat szolgáltatottak, azáltal, hogy irányították a hangyák keresési folyamatát. Ezek a fejlesztések elsősorban a keresés irányításában különböztek. Ezek közül a legjobb teljesítményű ACO algoritmusok azok voltak, melyekben a hangyák helyi keresést alkalmaztak.

3.2 Az utazó ügynök probléma

Az utazó ügynök problémát már régóta tanulmányozzák és manapság is a kutatók jelentős része erre irányul. Nagy szerepet játszik még a hangyakolónia optimalizációban is, mióta az első ACO algoritmust alkalmazták rá. Több ok miatt választották az utazó ügynök problémát:

- Könnyű alkalmazni rá az ACO algoritmusokat.
- Ez egy NP-nehéz optimalizálási probléma.
- Az új algoritmusok számára ez egy bevett tesztelési típus. Ha ezt a problémát hatékonyan oldják meg, akkor ez bizonyítja hasznosságukat.
- Könnyen megérthető, az algoritmus működése átlátható.

Az utazó ügynök probléma egy ügynökről szól, aki a szülővárosából indulva, adott városok érintésével szeretne tenni egy körutat, úgy, hogy a saját városába érjen vissza a végén és ez az út a lehető legrövidebb legyen. Formálisabban, reprezentálhatjuk a problémát egy teljes,

súlyozott $G = (N, A)$ gráffal, ahol N a csomópontok halmaza, melyek a városokat jelölik és A az élek halmaza, melyek összekötik N csúcsait. Mindegyik él rendelkezik egy d_{ij} értékkel, ami az él hossza, ahol $(i, j) \in A$, ez az i -edik és a j -edik város távolsága, és $i, j \in N$. Az utazó ügynök probléma egy minimális hosszúságú Hamilton-kört keres egy gráfban, ahol a Hamilton-kör egy zárt út, mely a G gráf minden $n = |N|$ csúcsát pontosan egyszer érinti. Szimmetrikus utazó ügynök probléma esetén a városok közötti távolság független az átkelés irányától, azaz $d_{ij} = d_{ji}$ minden egyes csúcspárra. A sokkal általánosabb aszimmetrikus utazó ügynök probléma esetén, legalább egy i, j csúcspár esetén fennáll az, hogy $d_{ij} \neq d_{ji}$. Szimmetrikus esetben, az euklideszi utazó ügynök problémát fogjuk használni, amelynél a városok az euklideszi sík pontjai és a köztük lévő távolságot az euklideszi normával számoljuk.

3.3 ACO algoritmusok alkalmazása az utazó ügynök problémára

Az ACO algoritmusokban a hangyák egyszerű ügynökök, akik utakat konstruálnak városról városra menve a probléma gráfjában. A hangyák megoldáskeresését mesterséges feromonösvények és heurisztikus információk segítik. Mikor ACO algoritmust alkalmazunk az utazó ügynök problémára, akkor minden (i, j) élhez kapcsolunk egy $\tau_{ij}(t)$ feromon mennyiséget, ahol $\tau_{ij}(t)$ egy numerikus információ, mely változik az algoritmus futása alatt, t pedig a ciklusszámláló. Szimmetrikus utazó ügynök probléma esetén mindig $\tau_{ij}(t) = \tau_{ji}(t)$. Aszimmetrikus esetben viszont valószínűleg $\tau_{ij}(t) \neq \tau_{ji}(t)$.

Kezdetben minden hangya egy véletlenszerűen kiválasztott városban van. Ezután iteratíván minden városra alkalmaznak egy állapotátmeneti szabályt. A hangya így konstruálja meg az útját: az i városban, a hangya kiválaszt egy még meg nem látogatott j várost. A választása függ az i és j város közötti él feromonjának erősségétől és egy rendelkezésre álló heurisztikus információtól. A heurisztika az él hosszának függvénye. A hangya így azt a várost választja, mely közel vannak hozzá, valamint azt, amelyiknél a várost és a hangyát összekötő él magas feromonmennyiséggel bír. Hogy meg tudjanak konstruálni egy lehetséges utat, a hangyáknak rendelkezniük kell egy korlátozott memóriával, amiben a jelenlegi részút tárolódik. Ezt a korlátozott memóriát nevezzük tabulistának. A memóriát arra használják, hogy minden egyes lépésnél meg tudják határozni, hogy mely városokat kell még meglátogatniuk, így garantálva,

hogy a megoldásuk szabályos lesz. Továbbá, lehetőséget ad a hangyáknak arra, hogy újra bejárják az utat, mikor az elkészült.

Miután minden hangya elkészítette az útját, a feromonokat frissítik. Ez úgy zajlik, hogy először az élek feromontartalma csökken egy konstans értékkel, majd a hangyák feromont helyeznek el minden olyan élen, amin végigmentek útjuk során. Az élek frissítése oly módon zajlik, hogy azok az élek, melyek a rövidebb utakat alkották és/vagy sok hangya ment végig rajtuk, azok nagyobb mennyiségű feromont kapnak, ezáltal az algoritmus további lépéseiben nagyobb valószínűséggel választják őket a hangyák. Ebben az értelemben a $\tau_{ij}(t)$ feromonmennyiség mutatja azt a tudást, mely alapján eldönthető, hogy a hangya a j várost válassza-e, ha az i városban van.

A legjobb teljesítményt nyújtó ACO algoritmusok a helyi keresés algoritmusát is alkalmazzák. Így, ezek hibrid algoritmusok, melyek kombinálják a hangyák valószínűségeen alapuló megoldáskeresését a helyi keresés algoritmusával. Az egyik oldalról, a helyi keresés javítja a hangyák által készített utakat, másrésztől a hangyák útjai ígéretes kezdeti megoldást adnak a helyi keresésnek. Azért ígéreteseket ezek a kezdeti megoldások, mert a keresési tapasztalatok miatt, a hangyák gyakrabban választanak olyan éleket, melyek rövid utakban szerepeltek.

Általánosságban, az utazó ügynök problémára alkalmazott ACO algoritmusok különleges algoritmussémát követnek. A paraméterek és az élek feromontartalmának inicializálása után a ciklus addig ismétlődik, míg a kilépési feltétel nem teljesül, ami lehet egy bizonyos számú megoldás előállítás, vagy egy megadott CPU-ido korlát elérése. A ciklusban először a hangyák utakat állítanak elő, majd ezeket javítjuk egy helyi kereséssel és végül a feromonokat frissítjük. Valójában, a jónak mondható NP-nehéz kombinatorikus optimalizációs problémákat megoldó algoritmusok közül a legtöbb ezt a sémát követi.

```
procedure ACO algoritmus az utazó ügynök problémára
    Paraméterek beállítása és a feromonértékek inicializálása
    while (kilépési feltétel nem teljesül) do
        Megoldások előállítása
        Helyi keresés %opcionális
        Feromonértékek frissítése
    end
end ACO algoritmus az utazó ügynök problémára
```

3.3.1 Ant System (AS)

Mikor az Ant System-et kifejlesztették, akkor alkalmazták az utazó ügynök problémára is. Kezdetben három különböző verzió volt az AS-ből: *ant-density*, *ant-quantity*, és *ant-cycle*. Míg az *ant-density* és az *ant-quantity* esetében a hangyák egyből frissítik a feromont amint átmennek egy városból egy szomszédos városba, addig az *ant-cycle* esetében a feromonokat csak azután frissítik, hogy minden hangya megkonstruálta a saját útját és elhelyezte rajta a feromont az út minőségétől függően. Mivel az *ant-cycle* jobban teljesített, mint a másik kettő, ezért ezt mutatom be és a továbbiakban Ant System (AS) néven hivatkozok rá. Az AS-ben mindegyik m darab hangya létrehoz egy megoldást, egy utat. A helyi keresést nem alkalmazzuk.

3.3.1.1 Az út megkonstruálása

Kezdetben minden hangya egy véletlenszerűen választott városban van. Egy k hangya minden konstrukciós lépésben alkalmaz egy valószínűségeen alapuló döntési szabályt. A valószínűség, amivel egy k hangya, ami jelenleg az i városban van, a j városba megy át az algoritmus t -edik iterációjában:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha * [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha * [\eta_{il}]^\beta} \quad \text{ha } j \in N_i^k$$

1. Képlet

ahol $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ egy heurisztikus érték, a két város közötti távolság reciproka. Az α és β paraméterek meghatározzák, hogy a feromonösvénynek és a heurisztikus információnak mekkora legyen a hatása. N_i^k pedig azon városok halmaza, melyeket a k -adik hangya még nem látogatott meg. Az α és β paraméterekre vonatkozó szabály a következő: ha $\alpha = 0$, akkor a közelebb lévő városokat nagyobb valószínűséggel választják a hangyák. Ez a klasszikus sztochasztikus mohó algoritmusnak felel meg. Ha $\beta = 0$, akkor csak a feromon alapján folyik a keresés. Ez gyors stagnáláshoz vezet, olyan utakkal, melyek erősen szuboptimális megoldások. Stagnálás alatt egy olyan szituációt értek, mikor az összes hangya ugyanazt a feromonösvényt követi és ugyanazt a megoldást hozza létre.

3.3.1.2 A feromonok frissítése

Miután az összes hangya elkészítette az útját, a feromokat frissítjük. Ez úgy történik, hogy először egy konstans értékkel csökkentjük a feromonmennyiséget minden élen, majd a hangyák az általuk látogatott élekre feromont helyeznek:

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - p) * \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$$

2. Képlet

ahol $0 < p \leq 1$ a feromon párolgásának mértéke. A p paraméter használatával elkerülhetjük azt, hogy az éleken korlátlanul felhalmozódjon a feromon, így az algoritmusnak lehetősége van „elfelejteni” a régebbi rossz döntéseket. Ha egy élt nem választanak a hangyák, akkor annak feromonerőssége exponenciálisan csökkenni fog. Az $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ képlet azt a feromonmennyiséget jelöli, amit a k -adik hangya elhelyez rajta. Következésképpen definiáljuk:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{L^k(t)} & \text{ha az } (i, j) \text{ élen átment a } k\text{-adik hangya} \\ 0 & \text{különben} \end{cases}$$

3. Képlet

ahol $L^k(t)$ a k -adik hangya útjának hossza. Az egyenlet szerint, annál jobb a hangya útja, minél több feromon van az azt alkotó éleken. Általánosságban, azok az élek, melyeken sok hangya megy keresztül és, amelyek rövidebb utakhoz tartoznak, azokat az algoritmus későbbi iterációiban a hangyák nagyobb valószínűséggel fogják választani.

Az AS-t összehasonlították más heurisztikákkal viszonylag kicsi, legfeljebb 75 várost tartalmazó problémákon. A kezdeti biztató eredmények ellenére, nagyobb városszám esetén az AS elég gyenge minőségű megoldást adott. Ezért, az ACO kutatások jelentős része az AS

fejlesztésére koncentrált. Az AS eredeti formáján történt első fejlesztés az *elitista stratégia* volt. Az ötlet az volt, hogy további megerősítést adunk a kezdés óta talált legjobb úthoz tartozó éleknek. Ezt az utat jelöljük T^{gb} -vel (global-best tour). A megerősítést úgy értjük el, hogy a feromonösvények frissítése során T^{gb} éleihez hozzáadunk egy $e * 1/L^{gb}$ mennyiséget, ahol e az elitista hangyák száma (akik megtalálták a legjobb utat). A kísérletek alapján megállapítható, hogy megfelelő számú elitista hangyával, az elitista stratégia alkalmazásával, az AS jobb utakat talál és mindezt hamarabb, mint a kezdeti AS. Túl sok elitista hangyát alkalmazva a keresés korán lekorlátozódik szuboptimális megoldásokra, ami korai stagnálást eredményez a keresésben.

3.3.2 MAX-MIN Ant System (MMAS)

A MAX-MIN Ant System egy közvetlen fejlesztése az Ant System-nek. Az MMAS-ban ugyanúgy történik az utak konstruálása, mint az AS-ben, azaz a városválasztásnál a valószínűségek kiszámítása ugyanazzal az egyenlettel történik. A fő eltérés az AS-hez képest a következő. Először is, hogy kihasználjuk a találtak közül a legjobb megoldást, minden iteráció után csak egyetlen hangya rakhat le feromont. Másodszor, hogy elkerüljük a stagnálást a keresésben, a feromonösvények erősségét lekorlátozzuk egy $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ intervallumra, ahol $\forall \tau_{ij} (\tau_{min} \leq \tau_{ij} \leq \tau_{max})$. Végül, a feromonösvényeket ennek az intervallumnak a legmagasabb értékével inicializáljuk, ami gyorsabb felderítést eredményez az algoritmus elején.

3.3.2.1 A feromonok frissítése

Miután minden hangya létrehozta az útját, a feromonösvények frissülnek a következő képlet alapján:

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - p) * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{best}$$

4. Képlet

ahol $\Delta\tau_{ij}^{best} = 1/L^{best}$. Az a hangya, melynek engedélyezett, hogy feromont rakjon le, az a legjobb megoldás az iterációban és talán az egész problémára is. Így, ha bizonyos élek

gyakran szerepelnek a legjobb megoldásban, akkor azok nagyobb mennyiségű feromont kapnak.

3.3.2.2 Korlátozások

A feromonerősség korlátozásának bevezetése az MMAS-ban azt szolgálja, hogy elkerüljük a stagnálást. Továbbá, a korlátoknak van olyan hatásuk, hogy behatárolják azt a p_{ij} valószínűséget egy $[p_{min}, p_{max}]$ intervallumba, mellyel a hangya egy j várost választ, mikor az i városban van. A kutatások alapján látható, hogy az alsó korlát jelentősebb, mert a maximális feromonerősséget a párolgás is szabályozza a futás során.

3.3.2.3 Inicializálás

A MMAS esetén a feromonösvények a felső korláttal inicializálódnak. Így, az utak felfedezése az algoritmus kezdetén gyorsabban történik, míg a feromonösvény-erőségek közötti különbségek kisebbnek bizonyulnak.

IV. Saját program bemutatása

4.1 Leírás, algoritmus

Egy olyan programot készítettem, mely az III. fejezetben bemutatott MIN-MAX Ant System heurisztikát implementálja és az utazó ügynök problémát oldja meg vele. Az utazó ügynök problémában szereplő városokat a felhasználó adhatja meg a grafikus felhasználói felületen. A program ezután kétféleképpen számolja ki a legrövidebb körutat: MMAS heurisztikával és egy egyszerűbb Nearest Insertion heurisztikával (NIH). Utóbbira azért van szükség, hogy az MMAS eredményét tudjuk mihez hasonlítani.

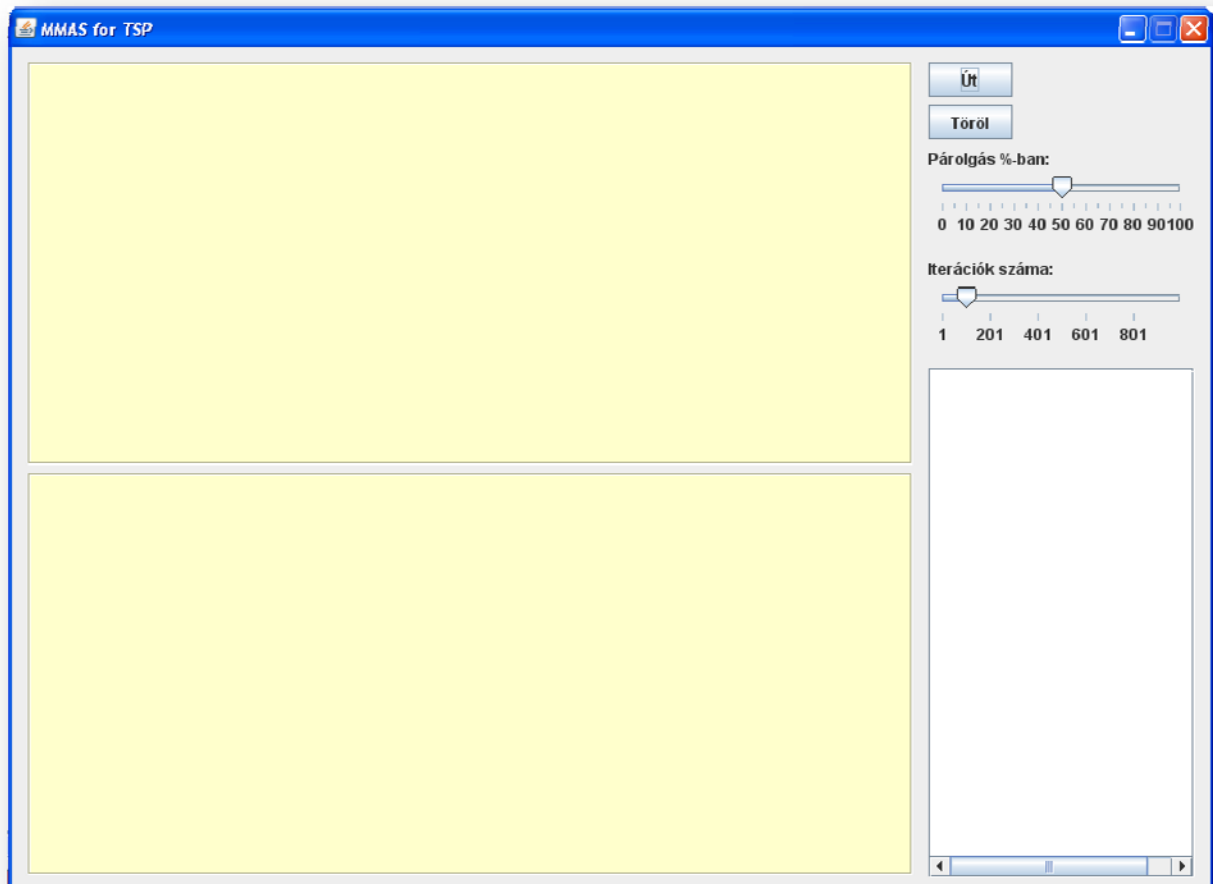
4.1.1 Nearest Insertion Heuristic

1. Kiválasztunk egy tetszőleges i csúcsot, és létrehozunk egy C körutat, ami csak az i csúcsot tartalmazza.
2. Keresünk egy olyan C -n kívüli csúcsot, mely legközelebb van C valamely csúcsához; legyen ez k .
3. Keresünk egy (i, j) élt C -ben, melyre $d(i, k) + d(k, j) - d(i, j)$ minimális.
4. Készítünk egy új körutat, melyben (i, j) -t helyettesítjük (i, k) -val és (k, j) -vel.
5. Ha C tartalmazza az összes csúcsot akkor megállunk. Ellenkező esetben a második pontra megyünk vissza.

4.2 A program működése

A programot Java nyelven írtam, NetBeans 6.7.1 fejlesztői környezetben. Induláskor egy grafikus felület jelenik meg, amely felhasználói interakcióra vár. Bal oldalon két panel található egymás alatt. A felsőre lehet kattintással városokat elhelyezni. Ezzel egy időben, ezek a városok az alsó panelen is megjelennek. Csúszkával állíthatjuk a párolgás mértékét, valamint az iterációk számát. A párolgás állítása a 4. *Képletben* szereplő p paraméter változtatását jelenti. Az *Út* gombra kattintva kezdi el számolni a program a legrövidebb

körutat a két heurisztikával. A felső panelen jelenik meg a NIH eredménye, az alsón pedig az MMAS-é. A jobb oldalt elhelyezkedő szöveges mezőben kapunk numerikus eredményeket. A program kiírja mindkét heurisztika legrövidebb útjának a hosszát, valamint az MMAS esetén azt is, hogy hanyadik iterációkban kaptunk az eddigieknél jobb eredményt, és ennek mekkora a hossza. A *Töröl* gombbal tudjuk letörölni a két panelt és új városokat felvinni. Új városokat hozzá lehet adni egy meglévő ábrához is.



A program elinduláskor

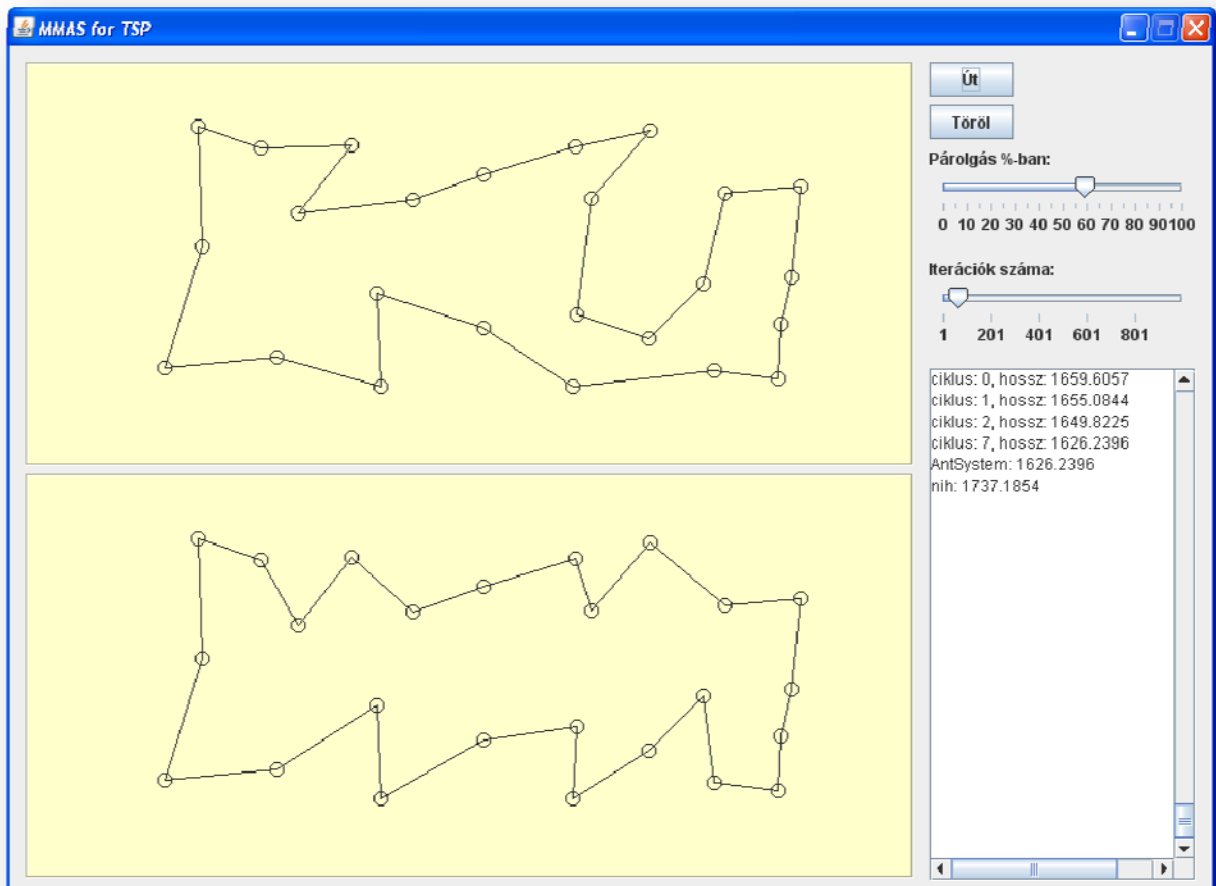
Az MMAS esetében a $\tau_{\min} = 0.1$ és $\tau_{\max} = 0.9$. Az 1. Képletben szereplő α és β paramétereket a kutatások alapján javasolt $\alpha = 1$ és $\beta = 5$ értékekre állítottam. A hangyák száma egyenlő a városok számával, oly módon, hogy minden városból egy hangya indul.

4.3 Megfigyelések

A program tesztelése során számos szituációt megfigyeltem, és ezek alapján arra az eredményre jutottam, hogy az MMAS heurisztika, az esetek túlnyomó többségében rövidebb

utakat állít elő, mint a NIH. Sok esetben 10-15%-os különbség is volt. Néhány esetben talált csak a NIH optimálisabb utat, mint az MMAS, de nem volt nagy az eltérés, maximum 5%-os, és ezt is lehetett csökkenteni legtöbbször, ha a párolgást módosítottam.

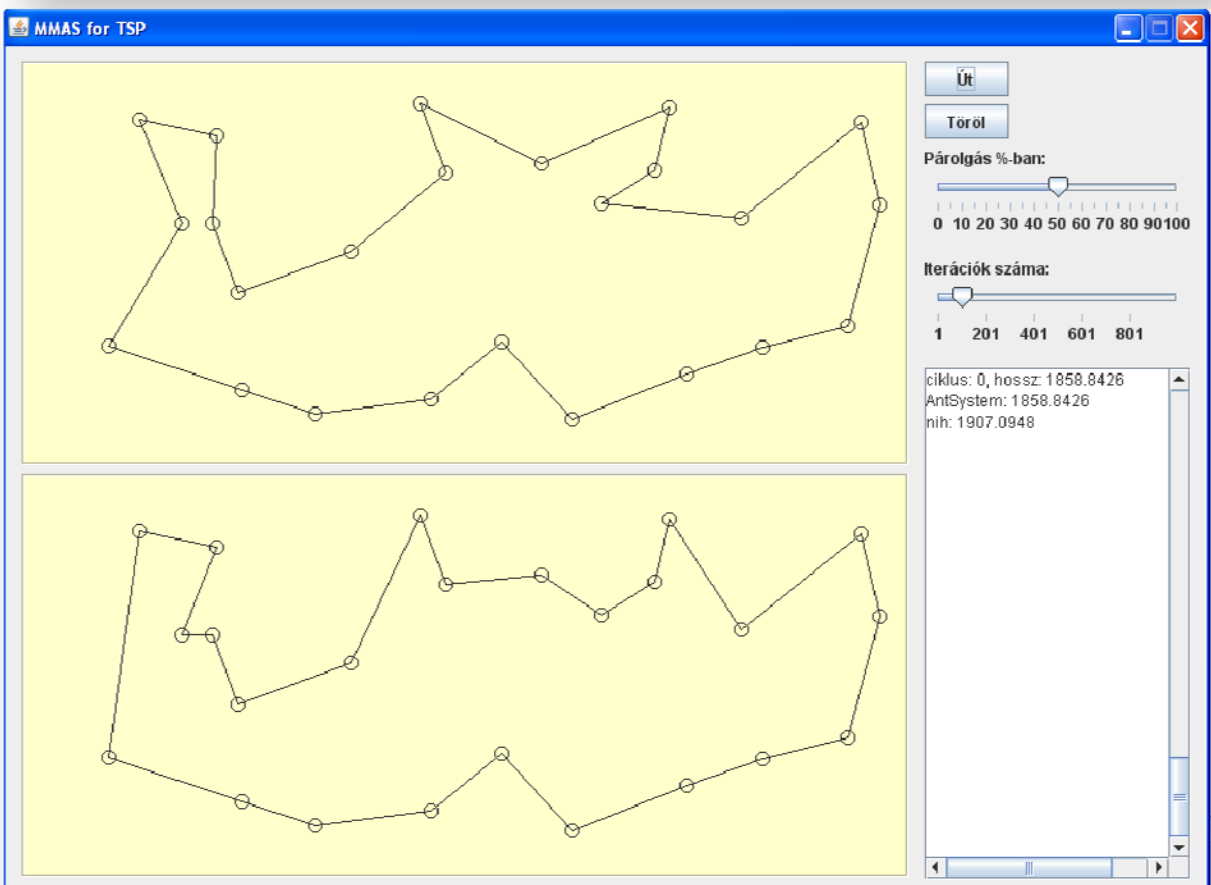
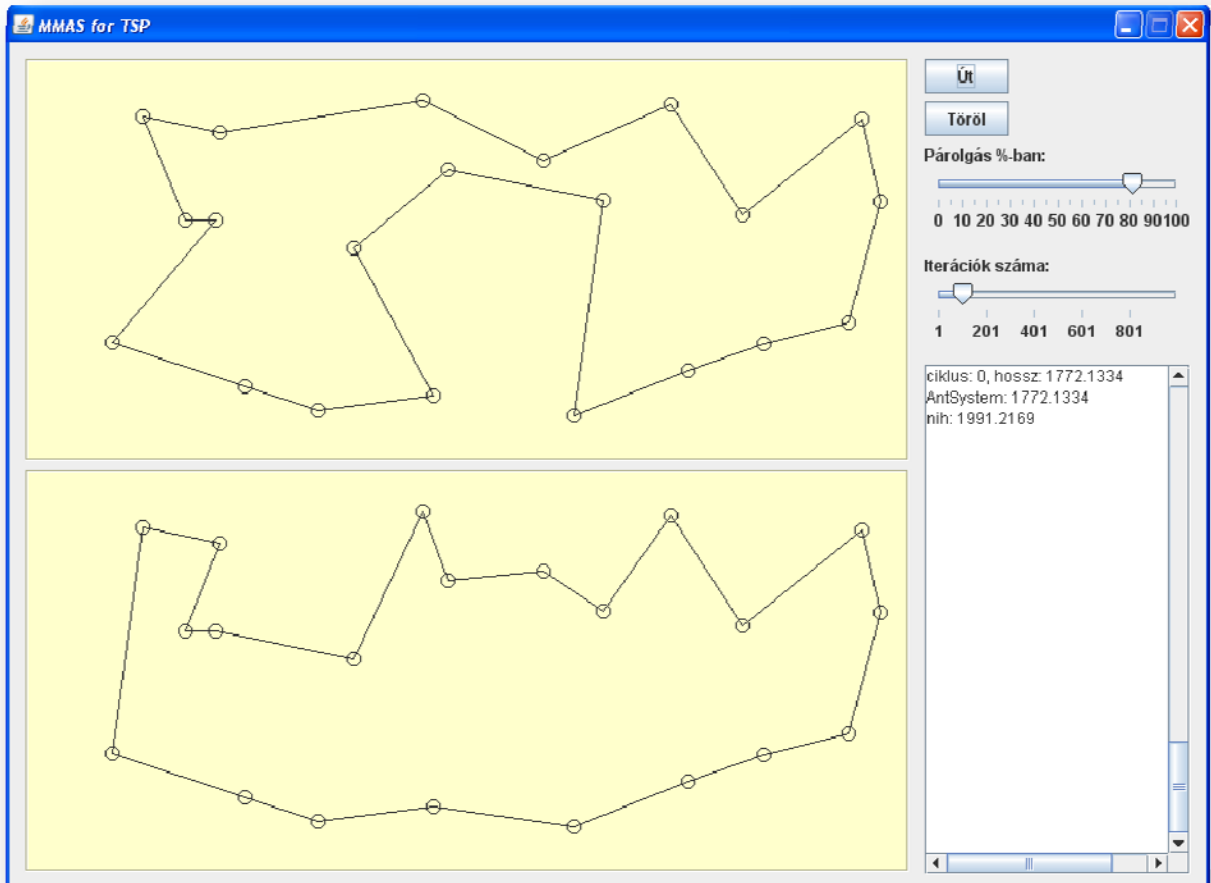
A következőkben a program olyan lefutásait mutatom be, amikor az MMAS heurisztika találja a rövidebb utat. Az esetek nagy többségében ez történik.

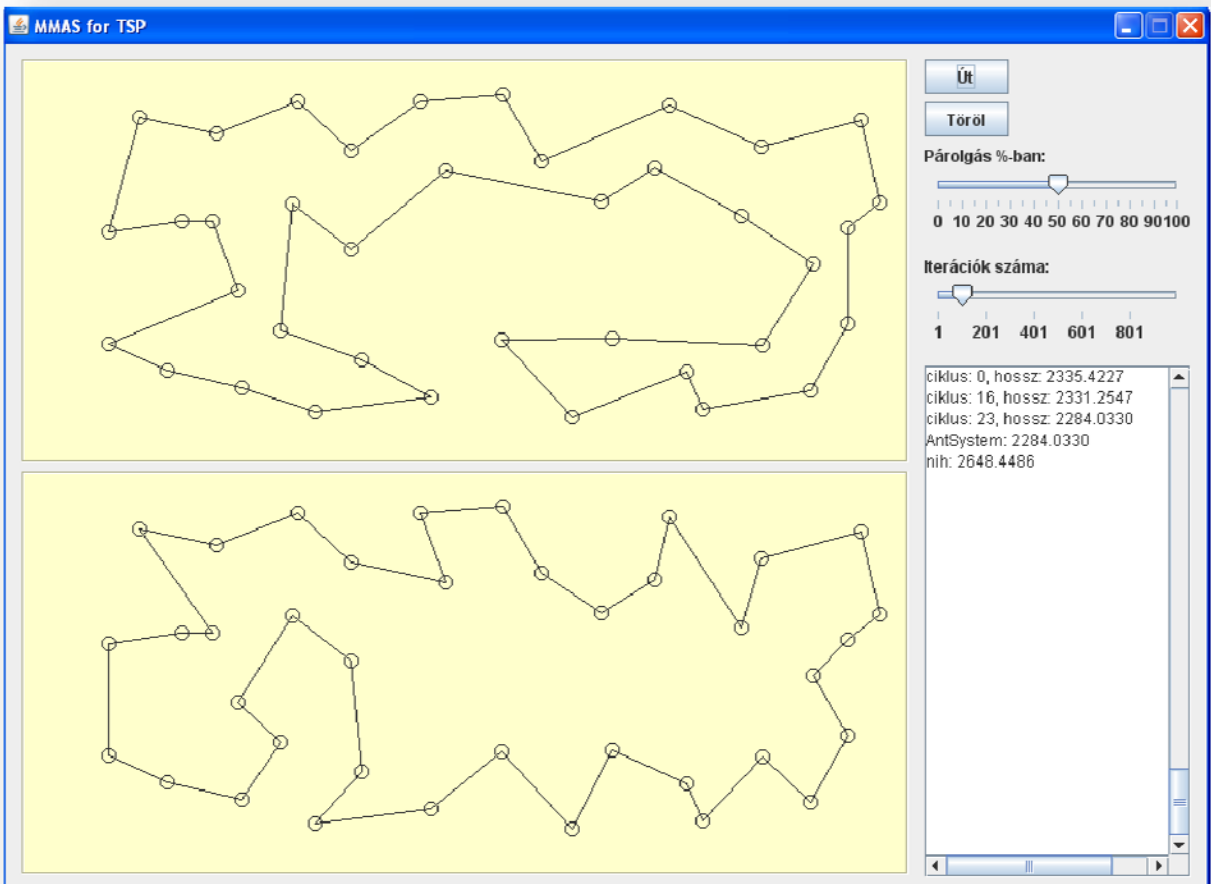
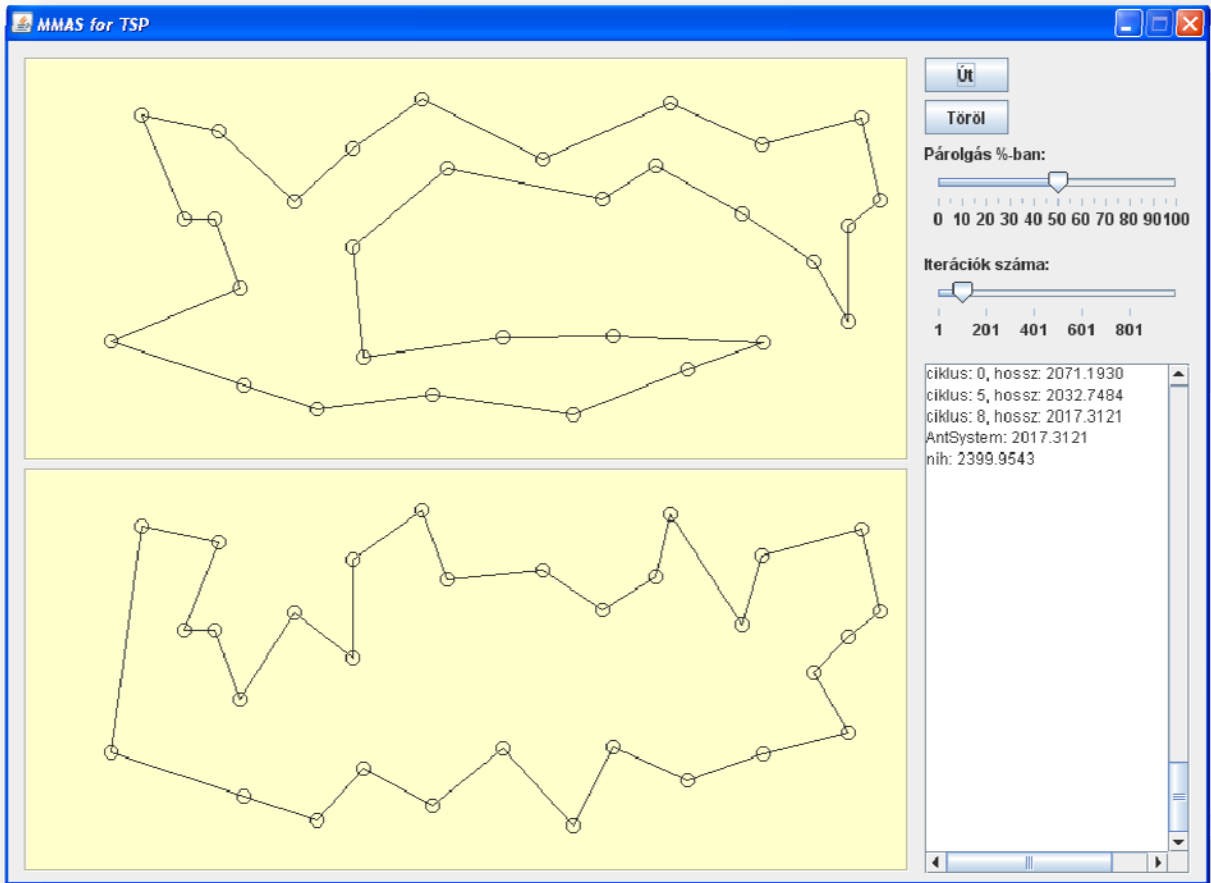


1. Ábra

A képernyőmentésen látható, hogy az MMAS (a képen AntSystem) 1626,24 pixel hosszú utat talált, míg a NIH csak 1737,19 hosszút. Ez 6,39%-kal hosszabb.

A következő példában négy egymást követő futtatás látható. Mindig hozzáadtam néhány új várost a korábbiakhoz és figyeltem a változásokat. Először kettőt, majd hetet, végül ismét hetet.





A példán látható, hogy az MMAS heurisztika mind a négy esetben optimálisabb utat adott meg, mint a NIH. Négyből három esetben pedig, 10% fölött volt ez az eltérés: első esetben 11%, a másodiknál 2,5%, a harmadiknál 16%, míg a negyediknél 13,7%. Az első két esetben, mikor még kevés számú város volt megadva, látható, hogy az MMAS már az első ciklus során megtalálta a legrövidebb körutat. Az első ciklus során még ugyanannyi a feromonmennyiség az összes élen, ezért, ekkor csak a mohó heurisztika alapján kapunk eredményt (tekinthetjük úgy, hogy ekkor az *1. Képletben* szereplő α paraméter értéke nulla). Am kevés város esetén, ez is elég erős megoldást tud szolgáltatni. Később, pedig több város esetén, jó közelítést ad, amit a feromonösvények aztán tovább pontosítanak. Ezzel magyarázható, hogy a harmadik esetben, mikor már több város van, akkor csak a nyolcadik ciklusban kapjuk meg a legrövidebb körutat, míg a negyedik esetben, ami a legtöbb várost tartalmazza, csak a huszonharmadikban.

Összefoglalás

A szakdolgozatomban bemutattam, hogy egyes élőlények hogyan küzdenek meg optimalizálási problémákkal a természetben, és ezt az emberek hogyan használhatják fel a saját optimalizálási problémáik megoldására. A hangyák élelemszerzési stratégiáját emeltem ki, és bemutattam, hogy miként használható ez fel az utazó ügynök probléma megoldására. Az általam készített programban a MAX-MIN Ant System heurisztikát implementáltam, de a témában való tájékozódás során talákoztam más megoldásokkal is, amikkel még optimálisabb, jobb teljesítményű programot lehetne írni.

A rajntelligenciának ezen kívül is vannak még izgalmas kutatási területei, mint például a robotika. Ebben egyre több speciális feladatot (mentés, felderítés, stb.) végző, alkalmasint már szagokra is érzékeny robotrajok állnak a középpontban. A robotrajok tagjai egyedekként és csoportokként is működőképesek. Nagy előnyük, hogy olyan terepeken is bevethetők, ahol élőlények (ember, kereső kutyák, stb.) nem. Fénnyel, hanggal, vagy virtuális kemikáliák (mesterséges feromonok) útján kommunikálnak egymással.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Kósa Márk témavezetőmnek, aki tanácsaival és szakmai tudásával nagy segítséget nyújtott a szakdolgozatom elkészítése során, illetve mindazoknak, akik további segítséggel támogatták szakdolgozatom elkészültét.

Irodalomjegyzék

C. Blum, D. Merkle (Eds.): Swarm Intelligence - Introduction and Applications 2008

M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni: The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents 1996

T. Stützle, M. Dorigo: ACO Algorithms for the Traveling Salesman Problem 1999

[http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-](http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-organization/Collective_decisions/Bee_foraging/bee_foraging.html)

[organization/Collective_decisions/Bee_foraging/bee_foraging.html](http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-organization/Collective_decisions/Bee_foraging/bee_foraging.html)

[http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-](http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-organization/Collective_decisions/Ant_foraging/ant_foraging.html)

[organization/Collective_decisions/Ant_foraging/ant_foraging.html](http://zool33.uni-graz.at/schmickl/Self-organization/Collective_decisions/Ant_foraging/ant_foraging.html)

<http://www.terebess.hu/keletkultinfo/rdawkins2.html>

<http://www.ieor.berkeley.edu/~kaminsky/ieor251/notes/2-14-05.pdf>

<http://origo.matav.hu/print/tudomany/fold/20060223egymast.html>

<http://www.origo.hu/tudomany/elovilag/20090506-biztos-kezzel-valasztanak-otthont-a-hagyak.html>

<http://www.nhit-it3.hu/it3-cd/12.%20Agensalapu%20technologiak.pdf>