

# **Mobil ágensek navigációjának vizsgálata szimulációs környezetekben**

című doktori értekezés tézisei

**Szabó Richárd**

Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar  
Programozáselmélet és Szoftvertchnológiai Tanszék

Bírálati vélemények alapján javított változat

Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatika Doktori Iskola  
Az informatika alapjai és módszertana program  
Iskola- és programvezető: Dr. Demetrovics János akadémikus

Témavezető:  
Dr. Kampis György  
tanszékvezető egyetemi docens

Budapest, 2006. 2008.



## Bevezetés

Az ember a történelem előtti időktől kezdve mindig jólétet próbál magának biztosítani. A tudományos-technikai fejlődés, ennek szolgálatában, az ipari forradalom során létrehozta a „fizikai testet” és a „mozgatóerőt”, míg az informatikai forradalom annak küszöbén áll, hogy létrehozza a „szellemet”, mely a test önálló irányítására lesz képes. E szellem, azaz a testet irányító intelligencia megvalósításának egyik kulcsfeladata ma a navigáció. Ezáltal a tárgyak, élőlények térbeli elhelyezkedése, viszonyai tisztázhatók és a cselekvőt magában foglaló környezet megismerhető, mely lényeges a további feladatvégzés szempontjából.

A hatékony navigáció megvalósításához több alternatív út vezet. Kézenfekvő lehetőség a mérnöki, konstruktív megközelítés, mely a „semmiből” a probléma alapos vizsgálatával konstruálja meg a megfelelő reprezentációkat és az azokat felhasználó algoritmusokat. Egy másik hozzáállás a már létező, sikeres eljárások elemzésén, lényeges mozzanatainak felhasználásán keresztül jut el a megoldáshoz. E létező navigációs módszereket az élőlények szolgáltathatják.

Mindkét esetben föl kell készülnie a tervezőnek a navigációval kapcsolatos számos nehézségre. A valós környezetbe helyezett ágensek — a klasszikus mesterséges intelligencia megközelítésétől eltérően — nem előfeldolgozott, absztrakt érzeteket használnak döntéseikhez, csupán véges felbontású, zajos, hibázásra hajlamos érzékelők alacsony szintű jelhalmazából alkothatják meg a külvilág reprezentációját, miközben saját cselekvéseik szintén pontatlanok, hibásak. Ehhez egyszerre kell meghatározniuk saját elhelyezkedésüket az érzékelt környezethez képest és a környező tárgyak egymáshoz való viszonyát saját pozíciójukhoz mérten. A navigációs eljárás során, a bejövő információk alapján, ki kell alakítani a környezet térképét, ami annyit jelent, hogy a megelőző pontatlan mérések javulnak, a helyes mérések megbízhatósága megnő, új információk jelennek meg az eddig még nem érzékelt térrészen, és esetleg korábbi, hibás információk törlődnek. Lényeges kérdés a térkép megfelelő reprezentációjának megválasztása, mely egyrészt alkalmazkodik a feladat specifikációjához, a szenzorok lehetőségeihez, a munkavégzés környezetéhez és a számítási kapacitáshoz is. Az ágenseknek a térkép elkészítése után mozgástervezést kell végezniük, ezzel a terepviszonyoknak és mozgási korlátaiknak megfelelő útvonalat találnak céljuk felé.

A feladat további nehézségét a változás adja, melynek eltérő módon kell tükröződnie a térképen, a változás jellegétől függően. Hasonlóan aktívan kutatott terület a szabadban végzett navigációé, mert az eddigi tájékozódási módszerek nem hatékonyak a kutatólaboroknál jóval nagyobb változatosságot mutató külső környezetekben, melyek általában könnyen felismerhető tereptárgyakban kevésbé bővelkednek, és a mozgástervezés valamint -kivitelezés új formáit is kikényszeríthetik.

Egy intelligens ágensnek a fenti nehézségek autonóm, robusztus megoldását akár tetszőleges, ismeretlen környezetben is valós időben kell elvégeznie, lehetőleg

univerzális módon. Jelenleg ez a mobil robotika egyik legfontosabb, egyelőre csak részlegesen megoldott problémája.

Az informatika tehát, miközben az elme egyéb funkciói mellett a környezet modellezését is megvalósíthatja, a szimulációval a navigáció kutatásának egy új módszerét is kínálja. Lehetővé teszi a probléma előzetes vizsgálatát, mélyebb megértését, más nézőpontot kínál fel, majd a hipotézisek felállításához nyújt támogatást. A számítógépes szimulációk segítségével a tájékozódással kapcsolatos kísérletek virtuális térben folyhatnak. Ez, azon kívül, hogy költség-, idő- és energiatakarékosabb, jóval rugalmasabb megoldás is, mivel a kísérletek bonyolultsága, valóság-hűsége szabadon alakítható, ami segítheti a vizsgált eljárások robusztusságának tesztelését, az adott számítási kapacitás lehető legjobb kihasználását, valamint az aktuálisan érdektelen részekről való eltávolodást, és a probléma lényeges elemeire való fókuszálást. Később jöhet el a szimuláció és a valóság eltéréseiből adódó esetleges tervezési hibák kiküszöbölése, az eredmények igazán megnyugtató igazolása a valódi, természetes környezetben végzett kísérletekkel.

Értekezéseimben mesterséges és természetes mobil ágensek, azaz robotok és hangyák navigációját vizsgálom. Először áttekintem, hogy milyen kérdések, nehézségek és előnyök jelentkeznek a szimuláció használatával kapcsolatban, majd a navigáció problémakörét vázolom, egyúttal bemutatom az ismertebb mérnöki és természetes megoldásokat. Ezután ismertetem egy robotikai versenyen elért eredményeimet, az ezzel kapcsolatos tapasztalataimat, melyek a navigáció további vizsgálatára ösztönöztek. A negyedik, ötödik és hatodik fejezetben a robotok foglaltsági hálón alapuló térreprezentálását elemzem. Először bemutatok egy működő diszkrét reprezentációs rendszert, mely különféle környezetek bejárását és feltérképezését végzi, majd ezt bővítem egy topológiai eljárással, illetve kamerát használó navigációval. A hetedik fejezet „hangyák” ételgyűjtése során a környezetben meglévő rendezettség és a hangyakolónia munkavégzésének kölcsönhatását vizsgálja.

Munkáimat megjeleníti a Citeseer Scientific Literature Digital Library és a DBLP Computer Science Bibliography is.

## **Alkalmazott módszerek**

A navigáció problémakörének vizsgálatára az intelligens ágensek számítógépes szimulációját alkalmaztam. Bár a szimuláció nem pótolhatja a hagyományos kutatási módszereket, de ezek hasznos kiegészítője lehet, ha a feladat analitikusan csak aránytalanul komoly erőfeszítés árán oldható meg.

A vizsgált tájékozódási problémák esetén is hasznos eszköz lehet a szimulátor. A kísérletek során a valódi környezetben felbukkanó problémák modelljét a Webots mobilrobot szimulátorban és a Repast általános ágensszimulátorban állítottam elő, C és Java programozási nyelveken. Az előzetes vizsgálatok során felállított hipo-

téziseket a szimuláció változó paraméterű futtatásai segítségével teszteltem és ezek alapján mondtam ki téziseimet.

## Eredmények

A szimulált ágensek navigációjával kapcsolatos vizsgálataim három csoportra oszthatók.

A robotszimulációs verseny során reaktív, környezetrepresentáció nélküli intelligens viselkedés létrehozásával foglalkoztam.

A Webots szimulátorban végzett további kísérletek a különféle térképkészítési és útvonaltervezési eljárások működésének elemzéséről, összehasonlításáról szólnak. Bár a térképkészítéssel kapcsolatos tézisek alapvetően ismert algoritmusok felhasználásával készültek, rendszerbe fogásuk és szimulátorban alkalmazásuk egyedinek tekinthető, és alapja lehet további fejlesztéseknek.

Az értekezés harmadik része a biológiai alapú navigáció témakörét érinti, egy olyan feladatot ismertet, melyben a csoporton belüli kommunikációra épülő tájékozódásnak kiemelt szerep jut. A „hangyák” ételgyűjtésével foglalkozó fejezetben a munkavégzés hatékonyságának és teljes folyamatának környezetfüggését vizsgálom.

**1. Tézis.** *Készítettem egy reaktív, moduláris felépítésű robotmodellt a Webots szimulátorban, mely az 1999-es Artificial Life Creators Contest nemzetközi versenyen második, a 2000-es hasonló megmérettetésen első helyet ért el.*

A robotszimulációs versenyben a tárgyakkal tagolt környezetbe helyezett robotok közül az volt a sikeresebb, mely a véletlenszerűen elhelyezett feltöltők használatával teljes lemerülését tovább el tudta kerülni. Mivel a futásonként változó környezetben a robotok korlátos, a növekvő számításigénnyel csökkenő időszeltekre kapták meg a vezérlést, ezért egy moduláris, aktivitáson alapuló dekompozíciót megvalósító, teljes környezeti reprezentációt nem készítő kontrollert hoztam létre ([1]), mely hasonlít a Brooks-féle viselkedésalapú architektúrához. Az irányításért folytatott modulok közötti versengés kimenetelét az érzékelt környezet, a korábbi cselekvések és a motivációk döntenek el. A redukált képfeldolgozás segít megtalálni az energiaforrásokat, míg a Braitenberg-jármű formájú mozgásmódulok, a robot akadálykikerüléséért, falkövetéséért, az energiaforrás megközelítéséért és a feltöltésért felelősek. A verseny azon kívül, hogy a díjként elnyert szimulátorprogrammal lehetővé tette a további kutatást, motivációt is adott a navigáció témakörének alaposabb megismeréséhez.

**2. Tézis.** *Elsőként hoztam létre a Webots szimulátorban egy foglaltsági hálón alapuló térképkészítő és értékiterációt használó útvonaltervező eljárást, mely ultra-*

*hangos érzékelői segítségével kreálja meg a modellezett környezetek térképét, és sikeresen járja be a különféle terepeket.*

A választott feladat gyakori állatoknál és robotoknál egyaránt, előbbieknél a környezet fontos helyeinek megismerése a túléléshez szükséges, utóbbiaknál a mindennapi feladatok elvégzéséhez, így a takarításhoz, a gyűjtögetéshez, terület őrzéséhez stb. elengedhetetlen. A megoldáshoz Thrun munkája nyomán egy módosított Khepera robot szonármérései alapján megalkotott inverz szenzormodell segítségével határoztam meg a robot körüli tárgyak távolságát, amivel egy lokális foglaltsági hálót hoztam létre. A lokális adatokat egy felügyelő program által adott pozíció felhasználásával a globális térképbe integráltam, miközben a különböző időpontokban készült méréseket egyesítettem, ezáltal a mérésekben meglévő zaj ellenére is egyre nagyobb megbízhatóságú térképet előállítva. A térkép létrehozása után egy értékiterációs eljárás adja meg, hogy melyik pozíciótól milyen messze található feltérképezetlen terület. A létrejövő költségmátrix lokális minimuma és az akadálykikerülés együttesen segítik a robotot az új irány felé ([2], [3]). A kialakított program öt eltérő környezet felderítését végezte el, melyek között nyílt terep, korábbi versenyhelyszínek, irodaszerű környezet és labirintus szerepelt.

**3. Tézis.** *Kiegészítettem a foglaltsági hálón alapuló térképezést egy topológiai gráfot létrehozó eljárással, mely az értékiterációs útvonaltervezést váltja fel. Megmutattam, hogy az új módszer hatékonyabb terepbejárást tesz lehetővé.*

Miután az értékiterációs útvonaltervezés sok memóriát igényel, és lokális információ alapján hoz döntést, ezért érdemes volt egy új eljárásra lecserélni ([4], [5]). Ehhez a foglaltsági háló vektorizációjának első lépéseként egy vékonyítási algoritmust használtam, majd az eredmény gráfélekké láncolását végeztem el Tombe és társai algoritmusának módosításával, végül a gráfot úgy optimalizáltam Rosin és West élszegmentáló eljárásával és az élek visszanyesésével, hogy bejárható útvonalakat reprezentáljon. Az új navigációs eljárás egy  $A^*$  algoritmust használó útvonaltervezésből és egy azzal felváltva működő akadálykikerülő viselkedésből áll. Az új eljárás a korábbi eredményekhez viszonyítva 65–80%-os időszükségletű. A javulás oka az, hogy a gráf hatékonyabban irányítja távoli üres térrészekbe a robotot, illetve az éleket követve a falak középvonalaán lehet haladni, s kevesebbszer kell akadály miatt kitérni.

**4. Tézis.** *A foglaltsági hálóként reprezentált térkép elkészítéséhez az ultrahangos érzékelő mellé bevezettem a kamera használatát, mely kinézetalapú akadályérzékelést biztosít, és topológiai gráfon alapuló útvonaltervezéssel általában hatékonyabb terepbejárást tesz lehetővé.*

A környezet részletekbe menő alapos megismeréséhez, a feladat szempontjából minél alkalmasabb térkép előállításához célszerű több szenzort és eltérő érzékelési modalitásokat alkalmazni. Ennek érdekében vezettem be a kamera használatát, mely a szonárral együttesen a környezet gyorsabb, robusztusabb térképezését teszi lehetővé ([6]). A lefelé billentett kamera megállapítja, hogy a padló a képmezőben melyik irányban milyen magasságig látható, majd egy előzetesen meghatározott függvény ezt tárgytávolságokra képezi le, ami a foglaltsági hálóba integrálható. Az útvonaltervezés az előzőekhez képest a robot időnkénti körbefordulásával és fényképezéssel bővül. A kamera használata topológiai gráffal alapvetően üres terek bejárásakor előnyös, amikor a fényképezés nagy területet tud felmérni, az ilyen jellegű terepeken a futási idő 70–80%-ra csökken. Szűk folyosók, kis szobák esetén nincs számottevő javulás. A kamerát az értékiterációs navigációhoz illesztve nincs előrelépés, mivel a robot továbbra is a lokális környezetbe gyűjtött információk alapján dönt, ami nem feltétlenül optimális.

**5. Tézis.** *Hangyák stigmergikus ételgyűjtő viselkedésének Deneubourg és társai által készített modelljében vizsgáltam az ételforrások megtalálásának és begyűjtésének hatékonyságát a környezet konfigurációjának függvényében. Beláttam, hogy a kezdeti rendezetlenség növekedésével monoton módon csökken a hangyaraj teljesítménye. Kimutattam, hogy az ételgyűjtés során a hangyák legnagyobb rendezettségének állapota nagyjából akkor következik be, amikor az étel a leginkább rendezetlen. Továbbá megfigyeltem, hogy a környezet kezdeti konfigurációjának összetettebbé válása — vagyis az étel szórásának növekedése — fölerősíti a hangyák viselkedésében meglévő véletlen szerepét.*

A tézis Gulyás Lászlóval és Laufer Lászlóval végzett közös munka eredménye ([7], [8], [9]). E munka során kidolgoztam a Deneubourg és társai által készített modellt a Repast szimulációs környezetben, illetve elkészítettem az általunk felvetett kérdések vizsgálatának kereteit. Az eredmények elemzését és a következtetések levonását együttesen végeztük.

A kutatás egyik motivációja annak elemzése volt, hogy a kollaboratív robotika számára nehéz problémát a szociális rovarok miként tudják hatékonyan és közelítőleg optimálisan megoldani, mi a szerepe a környezetnek a munkafolyamat szabályozásában és az egyszerű élőlények irányításában. Ennek elemzéséhez az étel-egységek közötti páronkénti távolságok átlagos értékét — mint a környezet rendezettségének mértékét — használva azt tapasztaltuk, hogy a kezdeti bonyolultság növekedése monoton csökkenő módon befolyásolja a hangyák teljesítményét, ami a véletlenszerűen mozgó hangyáknál megfigyelt, lényegesen eltérő kapcsolat alapján láthatóan nem magától értetődő.

Egy ételforrás esetén behatóan tanulmányoztuk az ételgyűjtés teljes folyamatát, a hangyák rendezettségére az ételével egyező mértéket bevezetve. Azt tapasztaltuk, hogy a hangyakolónia rendezetlensége az exploráció fázisában hirtelen megnő,

majd az ételforrás megtalálásakor folyamatosan csökken, és az étel elfogyása után újra megemelkedik. Eközben az étel rendezetlensége az elhordás következtében mindaddig nő, amíg a fészekben nem lesz több egység, mint a forrásnál. Kimutattuk, hogy a hangyakolónia nagyjából akkor éri el rendezettségének maximumát, amikor az étel rendezetlensége a maximumon van. Ebben az optimális időszakban dolgozik a legtöbb hangya a feromon által kijelölt ösvényen, és ekkor van a legtöbb ételegység mozgásban.

Megfigyeléseink nyomán az is kijelenthető, hogy az étel nagyobb szórása, vagyis az összetettebb környezet a futás nagyobb fluktuációját okozza. Miközben az étel rendezettségének jellege a begyűjtés közben a nagyobb szórástól nem változik számottevően, addig a hangyák viselkedésében meglévő véletlen elem — különösen a folyamat utolsó szakaszában — hangsúlyosabbá válik. Bár a szórás alapvetően az étel elhelyezését határozza meg, egyúttal a hangyák egyéni döntéseinek szerepét is fölértékeli.



## A disszertációhoz kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [1] R. Szabó. *Mobil robotok szimulációja*. Eötvös Kiadó, 2001.
- [2] R. Szabó. Navigation of simulated mobile robots in the Webots environment. *Periodica Polytechnica — Electrical Engineering*, 47(I-II):149–163, 2003.
- [3] R. Szabó. A foglaltsági háló és már térképépítési stratégiák. In E. Kubinyi and Á. Miklósi, editors, *Megismerésünk korlátai*, pages 135–145. Gondolat Kiadó, 2006.
- [4] R. Szabó. Topological navigation of simulated robots using occupancy grid. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1(3):201–206, 2004.
- [5] R. Szabó. Combining metric and topological navigation of simulated robots. *Acta Cybernetica*, 17(2):401–417, 2005.
- [6] R. Szabó. Occupancy grid based robot navigation with sonar and camera. In *Proceedings of CSCS'2006, The Fifth International Conference of PhD Students in Computer Science, University of Szeged*, 2006.
- [7] L. Gulyás, L. Laufer, and R. Szabó. An information theoretic approach to stigmergy: The case of foraging ants. In *Proceedings of AISB'06: Adaptation in Artificial and Biological Systems*, volume 3, page 203, 2006.
- [8] L. Gulyás, L. Laufer, and R. Szabó. Measuring stigmergy: The case of foraging ants. In *Proceedings of the Fourth International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications (ESOA 2006/AAMAS 2006, May 2006, Hakodate, Japan)*, pages 76–91, 2006.
- [9] L. Gulyás, L. Laufer, and R. Szabó. Measuring stigmergy: The case of foraging ants. In S. Brueckner, S. Hassas, M. Jelasity, and D. Yamins, editors, *The Fourth International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications (ESOA 2006)*, number 4335 in Lecture Notes in Artificial Intelligence, pages 50–65. Berlin, 2007.
- [10] R. Szabó. Neural network controlling architectures in autonomous agents. In *Agents Everywhere – Proceedings of the First Hungarian National Conference on Agent Based Computing*, pages 99–109, 1999.