

PhD értekezés tézisei
-tézisfüzet-

**Pozicionálási pontosságon alapuló,
közel idő-optimális pályatervezési eljárás
mobilrobotokhoz**

Írta:
Nagy István
levelező Ph.D. hallgató

Témavezetők:
Dr. Vajta László, egyetemi docens
Prof. Dr. Arató Péter, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

BUDAPEST
2009

I. Bevezetés

Szinte minden élőlény rendelkezik valamilyen célszerű tájékozódási képességgel, amely azután az élőlény intelligencia szintjétől függően lehet ösztönyszerű, vagy tudatos. A mobilrobotok navigációs sémáinak analógiája, sok esetben, az élővilágban megfigyelt navigációs sémák alapján kerültek kifejlesztésre, lásd BUG algoritmusok [1], vagy [4]. A tervezők próbálnak minél tökéletesebb önállóan cselekvő robotokat létrehozni, csak az a kérdés, hogy mi a tökéletes?

Ha az emberi érzékszerveket vesszük alapul, a robotokban használt érzékelők nagy része már meghaladja az emberi érzékelés határait, és mégis egy ember gyorsabban és jobban tájékozódik, mint a legfejlettebb robot. A válasz az emberi gondolkodás, és az *algoritmus-alapú* tervezés különbségében keresendő. Az önállóan működő robotok, csak egy kész *algoritmuskészletből* válogathatnak, egy döntéshozó mechanizmus segítségével.

Nézetem szerint, az egyéb fontos kérdéseket nem mellőzve, egy robot intelligenciaszintjét nagyban meghatározza, hogy milyen *algoritmus-készlettel* dolgozik, és ennek a készletnek a fejlettsége.

A *robotizáción* belül a mobilrobotokkal foglalkozó tudományág az utolsó tíz év alatt nagyon nagy fejlődésen ment keresztül. Eljutottunk a kötött pályán mozgó robotoktól az ismeretlen környezetben önállóan navigáló járművekig. Ezek a „szerkezetek”, - annak érdekében, hogy előírt feladataikat megfelelően el tudják látni - szinte minden "porcikájukban" napjaink legfejlettebb technológiájával vannak felszerelve. Ahhoz, hogy egy robot mobilis legyen, valamilyen járószerkezetre van szüksége (kerék, lábak, lánctalp, ...stb.) melyeknek meghajtásához nagyon jól szabályozható precíziós motorokra van szükségünk. Mindezek után egy robot már megmozdulhat, de sajnos még hiányzik belőle az "*intelligencia*".

A robot intelligenciáját egy visszacsatolásokkal ellátott szabályozó rendszer képezi, ami többé-kevésbé valamilyen hierarchikus rendszerbe van szervezve.

Egy mobilrobot rendszer legfontosabb összetevői lehetnek:

fizikai összetevők:

- járószerkezet és a robot teste
- külső és belső érzékelők, motorok, tápegységek
- a robot látórendszere (ha az érzékelőktől külön tárgyaljuk)
- processzorok, memóriák és kommunikációs egység

logikai összetevők:

- a járószerkezet mozgását irányító modul
- az érzékelők jeleit kiértékelő modul
- a viselkedés kiválasztását irányító modul
- pályatervező és optimalizáló modul

A felsoroltak közül mindegyik téma külön kutatási terület lehet, sőt egy-egy témában rengeteg megoldási lehetőség is rejtezik, melyek közül majd csak a további kutatások folyamán derül ki, hogy melyik módszer is volt/lesz a leghatékonyabb az egyes tipikus speciális alkalmazási területeken.

Ahhoz, hogy megtaláljuk a leghatékonyabb módszert, és nem utolsósorban pénzt és időt takarítsunk meg, *modelleznünk* kell a megadott rendszert. A mobilrobot-kutatások terén, a pontos modelleknek nagyon fontos szerepük van az új pályatervező/navigációs rendszerek, eljárások, algoritmusok kifejlesztésében. Segítségükkel finomíthatjuk a pályatervező/navigációs program utasítássorozatát, különböző analíziseket végezhetünk, melyek alapján meghatározhatunk pozíció ellenőrzési pontokat, javasolhatunk különböző marker-elhelyezéseket, vagy esetleg más szenzorberendezést.

Az értekezés témája:

A nem kötött pályán mozgó mobil ágensek fejlődési iránya az ember által irányított ágensektől, a teljesen önálló (autonóm) ágensek felé tendál. Ha kategorizálni szeretném ezt a fejlődést, akkor három osztályt állapítanék meg: 1.) emberi irányítással működő ágensek, 2.) fél automata (emberi+gépi irányítás) ágensek, 3.) teljesen autonóm ágensek. Jelen értekezés témája ebbe a harmadik osztályba sorolható.

A kutatás fő témaköre egy olyan algoritmus-rendszer (pályatervező eljárás) kifejlesztése, amely a markeres navigáció pozíció-mérési pontosságát kiindulásként felhasználva, először, egy „a priori” ismert munkaterületen, megállapítja a megengedett pozícionálási hibakorlát betartásával bejárható *navigációs területeket*¹, majd felépít egy *irányított gráfon* alapuló ún. „*gráf-térképet*”². Ezek után, az algoritmus, az *optimalizációs előírásoknak* megfelelően, megkeresi a végrehajtandó trajektóriát a kiindulási- és célkoordináták között. Ez, az általam kidolgozott algoritmus-rendszer, a fentebb említett algoritmus-készlet egy olyan része, amely a *pályatervezést*, a mobilrobot lokalizációját végző *mérőberendezés pontossága* és egy *megengedett maximális pozícionálási hiba* alapján valósítja meg. Mindezek mellett figyelembe veszi a végrehajtandó útvonalak bonyolultságát, és a kiválasztott végleges útvonalat ún. lágygörbe (*B-spline*) formájában adja meg.

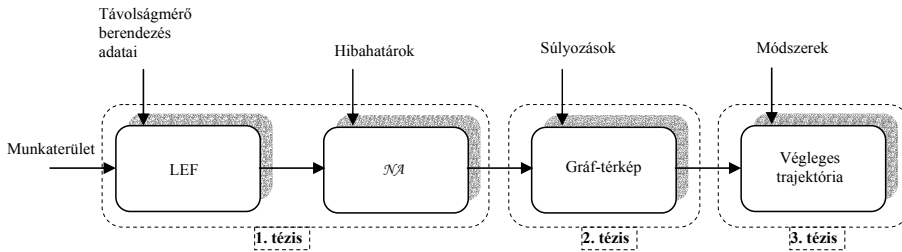
Az algoritmusok működését, és azok helyességét úgy próbálom igazolni, hogy felépítem a munkaterület, és a rendszer *matematikai világmodelljét*, amelyen alátámasztom téziseim helyességét. A munkaterület geometriai térképét, a modellezés szempontjából, megfelelő felbontással digitalizálnom kell, ahol a *maximális felbontás* a robot *minimális lépéshosszával* lehet egyenlő. A digitalizálás eredménye, hogy a dolgozatban egyes kifejezések *diszkrét formában* jelennek meg (lokalizációs hibaterkép (*LEF*), navigációs terület (*NA*)) és természetesen a felbontástól függően megjelenik a modell hibája is.

A tézisfüzet a felépítését tekintve három nagy fejezetre és ezek alfejezeteire tagozódik. Az elsőben a bevezetés és a téma felvezetése található, a másodikban a kutatás módszereivel és eszközeivel találkozhatunk, míg a harmadik fejezet tárgyalja az új tudományos eredményeket. A harmadik fejezet további alfejezeteire van osztva, mégpedig egy fejezet tárgyalja a tézist, majd az ennek megfelelő alfejezet, a tézis bővebb kifejtését. Ennek megfelelően, a dolgozat és a dolgozatban megfogalmazott *tézisek/ altézisek*, a lentebb látható ábrának megfelelően, *egymásra épülnek*. Minden alfejezet végén a tézissel kapcsolatos

¹ a *navigációs terület* meghatározását lásd, III.2. fejezet.

² a *gráf-térkép* meghatározását lásd, III.3.1. fejezet.

saját publikációválogatás látható, majd a tézisfüzet legvégén, pedig az irodalomjegyzék.



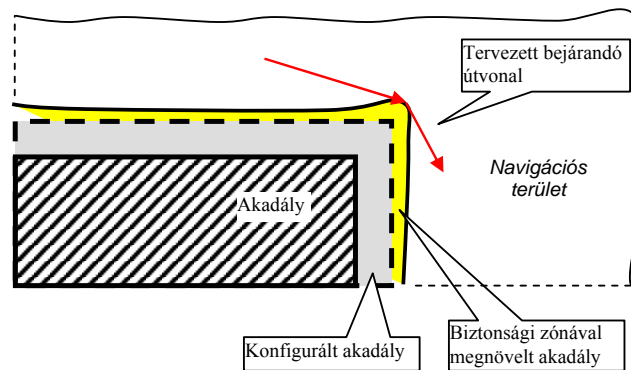
I.1. Motiváció és célkitűzések

Doktoranduszi kutatásaimat -időrendi sorrendben- a mobilrobotok látórendszereinek tanulmányozásával kezdtem, majd ismert és ismeretlen környezetben, *markerek* (előre meghatározott mérési jelző-pontok) alapján történő pályatervezéssel, ezek modellezésével, és végül mindezek alapján *egy komplex, pozíció-bemérési (lokalizációs) pontosságon alapuló pályatervező eljárás* létrehozásával folytattam.

I.1.1. Motiváció

Ez idáig, a mobilrobot technikában elterjedt felfogás alapján egy mobil ágens³ által bejárható terület a munkaterület és a konfigurált⁴ akadályok által elfoglalt területek különbségéből került megállapításra. Ez problémát okozhat több pályatervezési algoritmusnál is. Nézzük a *csökkentett szabad terület (AFS)* általános definícióját „az akadályokat megnöveljük a mobilrobot köré írt kör sugarával, majd ezeket kivonjuk a munkaterületből” [2]. Vegyük a következő pályatervező algoritmusokat: *látathóság elvén* való pályatervezés, *BUG* algoritmus, *TBA* algoritmus [1], *SFP* algoritmus [3] és sorolhatnám. Közös bennük, hogy mindegyik az akadályok közvetlen közelében tervezi az útvonalat. Ezekben az esetekben, amennyiben nem vesszük figyelembe a lokalizációs pontosságot, könnyen előfordulhat, hogy mobilrobotunk akadályba ütközik. Igaz, hogy a konfigurált akadályokhoz a későbbiekben hozzáadtak egy ún. *biztonsági zónát*, amely százalékosan megállapította, hogy a biztonságos haladás érdekében még mennyivel kell megnövelnünk a konfigurált akadályokat, de ez egy érték-átalány volt és nem egy alátámasztott pontos érték.

Ezt a hibát küszöböli ki az általam kifejlesztett *E-Zone* létrehozása. Segítségével pontosan meg tudom mondani, hogy egy *adott mérőrendszer és marker-konfiguráció* esetében hol és milyen értékkel kell megnövelni a konfigurált akadályokat, továbbá felfedi, és *E-Zone*-ként megjelöli a munkaterület szabad területein belül azokat a „fekete foltokat”, ahol a mobilrobot nem tud a kívánt pontossággal lokalizációs ellenőrzőmérést végrehajtani. További előnye, hogy az *E-Zone*-ként megjelölt biztonsági zóna az akadályok mentén nem egyetemes, a lokalizációs pontosságtól függően lehet keskenyebb/szélesebb, ami kritikus helyeken (szűk átjárók) meghatározó lehet.



A pályatervezéssel kapcsolatban még további két motivációt tekintek mérvadónak.

- Az *első* motiváció az eddigi pályatervező algoritmusok azon hibájának kiküszöbölésére irányul, hogy az eddigi súlyozott gráfok esetében a fejlesztők nem vették figyelembe a pálya dinamikáját. Többnyire csak a gráfok éleit súlyozták és a csomópontokat nem [4]. Ezzel figyelmen kívül hagyták a bejárandó útvonal kanyarodási sugarait, a pálya dinamikáját és bonyolultsági fokát.

- A *második* motiváció a Spline-os pályatervezés [5] előnyeit próbálja kiaknázni úgy, hogy a közel idő-optimalis, szélsőséges gyorsulásoktól mentes trajektória létrehozása mellett még a *biztonságos*, illetve ha kell, a *gyors* bejárési útvonalat adja.

³ mobil ágens – egy önállóan közlekedő mobilrobot

⁴ konfigurált akadály – a mobilrobot köré írt kör sugarával megnövelt akadály

1.1.2. Célkitűzések a mobilrobot lokalizációjával kapcsolatban

Ismeretes, hogy a tervezett és valós pozíciók közti eltérést hibának nevezzük, amely hiba a végrehajtás során fellépő pontatlanságokból adódik. Ezek a pontatlanságok lehetnek a rendszer lokalizációs pontatlanságai, amihez hozzáadódnak egyéb szisztematikus illetve véletlenszerű hibák is, mint pl. a járószerkezetek csúszásából származó hibák, ... stb.

Az értekezés behatárolt terjedelme miatt nincs lehetőségem végigelemezni az összes pozicionálást végző mérőberendezést, ezért a modellezésben kiválasztottam azt, amihez némi gyakorlati mérés is kapcsolódik, ez pedig a *markeres helymeghatározás, optikai mérőrendszer* segítségével. Célom, hogy az eddig használt lokalizációs hibamodellek mellett [6], [7], felállítsak egy olyan hibamodelt, amely az adott mérőrendszerre valósághűen megadja a lokalizációs hibát és annak korrekcióját. A robot dinamikájából származó hibákkal (csúszás, ... stb.) a modellben nem foglalkozom.

A lokalizációs pontosságon a robot kiszámolt és valós pozíciója közti eltérés *megméréseinek* pontosságát értem. Ez a mérés nagyon fontos a pályatervezésben, ugyanis a továbbiakban az összes többi számítás ezen alapul.

További célkitűzésem, hogy az adott hibamodell segítségével, egy adott marker-elrendezés esetén meghatározzam a bejárható munkaterület minden pontjában a várható bemérési pontosságot és az adatok alapján összeállítsam a munkaterületet lefedő ún. *lokalizációs-hibatérképet (LEF)*. A hibatérkép alapján a bejárható munkaterület minden egyes pontjában meg tudom mondani:

- az adott rendszerrel végrehajtott mérés pontosságát,
- mely markerpároktól mérve kapom a minimális bemérési hibát.

1.1.3. Célkitűzések a pályatervezéssel kapcsolatban

Jelen értekezés a pályatervezésnek egy eddig nem használt módját taglalja. Célom egy olyan eljárás létrehozása, mely a rendszer lokalizációs hibájából és, a felhasználó által, egy előre meghatározott *maximális lokalizációs hibából* ($MLEF = \varepsilon_{max}$) kiindulva az általam létrehozott *navigációs területen* belül egy olyan, közel idő-optimalis végrehajtási útvonalat eredményez, amely útvonal lehet: *a.*) a *legbiztonságosabb*, vagy *b.*) a *leggyorsabb*; a *start* és *cél* koordináták között. A pályatervezés sarkalatos kérdései, hogy a mérési rendszer megadott hibájával, egy ismert marker-elrendezés mellett:

- Létezik-e útvonal a kiindulási- és célkoordináták között?
- Amennyiben nem létezik, annak mi az oka?
- Amennyiben több útvonal is létezik, melyik közülük a minimális bonyolultságú, a biztonságos, és a közel idő-optimalis?

II. A kutatás módszerei, eszközei

A kutatási *módszerek* kiválasztásánál arra törekedtem, hogy olyan módszert válasszak, amivel egy robot „intelligenciaszintje” növelhető a létrehozott *modell* alapján. Ahhoz, hogy egy intelligenciaszintet növelni tudjak, először is nagyon fontos megismerni a jelenlegit. Így, kutatási módszereim kezdeti szakaszában a már meglévő, általam elérhető, és reményeim szerint a teljes irodalom felkutatása szerepelt. Ezek után a megismert rendszerek különböző szempontok alapján történő összehasonlítása következett, majd az egyes rendszerek gyengéinek/előnyeinek felismerése. Ezen tulajdonságok elemzése után, -és a laboratóriumunkban, akkor folyamatban lévő projektek, (*LABRADOR*, *SENATOR* [T11-5]) rendszereinek figyelembevételével-, következhetett az általam elképzelt *szimulációs rendszer* megtervezése.

A kutatás során kidolgoztam a *távolságmérésre használt eszköz modelljét*, ami nem más, mint egy lézeres kamerás rendszer, amely a triangulációs módszer segítségével megállapítja a mért ponttól való távolságot. Esetemben a mért pont egy speciális marker, amely biztosítja a rávetődött lézertény lehető legpontosabb visszaverődését. A markerek a munkaterületen ismert pozíciókban helyezkednek el.

A rendszer ismerete azért fontos számomra, hogy fel tudjam állítani a mérőrendszer matematikai modelljét és a *megfelelő hibamodelt*. Először fel kell ismernem milyen hibákkal számolhatok, utána ezekre a hibákra ki kell dolgoznom a megfelelő hibafüggvényt, majd meg kell győződnöm a modell helyes működéséről. A videokamera jellegzetes paraméterei: *fókusz-távolság*, *érzékelő lapka felbontása* és *pixelhibája*, optika torzitása. A lézertény jellegzetes paraméterei: forogást végző motor *szögfelbontása*, lézertény szórásából keletkező hibák. A rotációs mérőfej szempontjából még további fontos paraméter a *kamera és lézertény közti távolság*. Az említett paraméterek elemzése látható a dolgozat megfelelő fejezeteiben.

II. 1. A munkához felhasznált források

Mivel a mobilrobotok témaköre még aránylag új, de ennek ellenére nagyon gyorsan fejlődő kutatási terület, így a kutatáshoz szükséges irodalom is jórészt konferenciákon, ill. szaklapokból és külföldi irodalomból szerezhető be. Mindenféle fontossági sorrend figyelembevétele nélkül sok egyéb között megemlíteném az amerikai *MIT*, *Stanford*, *CalTech* és *Cornell* egyetemeket, továbbá a karlsruhei *IPR*, az orosz *USATU*, a *poznan* *TU* egyetemeket, melyekkel egy közös projekt (*Copernicus*) kidolgozásán is részt vettünk. A továbbiakban figyelemmel kísértem a portói (*Machado*), zágrábi (*Cubriilo*, *Ribaric*), bécsi (*Elmenreich*, *Kopacek*), pozsonyi (*Frankovic*) és ljubljanaei (*Zlajpah*) műszaki egyetemeken folyó mobilrobotokkal kapcsolatos kutatásokat is.

A képfeldolgozással és a robotrendszerekkel kapcsolatban nagyon sokat merítettem a *BME* -n, tartott előadásokból, a

robotvezérlés¹⁰, a számítógépes grafika¹¹, és a gépi látás¹² területén, továbbá a *MoMic* laboratóriumban tartott laboratóriumi mérésekből, kísérletekből.

III. Új tudományos eredmények, tézisek

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek az egymásra épülő tézisek, majd az alfejezetekben ezek bővebb kifejtései.

III. 1. Első tétel

Tétel 1: *Új, a felhasználó által specifikált feltételekre épülő, akadálymentes terület megtervezését biztosító eljárást fejlesztettem ki, amely eljárás egy új lokalizációs hibaterképet eredményező **modellből**, valamint egy, e modellt felhasználó új **algoritusból** áll.*

Tétel 1.1: *Új **modellt** fejlesztettem ki, amely lehetőséget nyújt arra, hogy a mobilrobot mindenkori pozíciójához egyértelműen hozzárendelje az ott várható lokalizációs bizonytalanság értékét. Az eljárás kiinduló adatbázisa a szenzorrendszer specifikációja (az alkalmazott szenzorrendszerre vonatkozó hibaadatok) mellett a munkaterület leírása, a mérés szempontjából lényeges pontok (markerek) feltüntetésével, eredménye pedig a munkaterület lokalizációs hibaterképe (LEF).*

Tétel 1.2: *Új **algoritmust** fejlesztettem ki a bejárható trajektóriák lehetséges helyeit leíró összefüggő navigációs területek meghatározására, mely eljárás kiindulva a lokalizációs hibaterképből (LEF) és a felhasználó által megadott, a munkaterület egyes lokalizációs pontjaira/területeire vonatkozó megengedett maximális pontatlanságból ($\varepsilon_{\max(i)}$) megalkotja a munkaterület szabad tereiben a lehetséges összefüggő navigációs területet (\mathcal{NA}).*

*A navigációs területek biztosítják a felhasználó számára, az **által megadott feltételek** (kívánt mérési pontosság) betartása mellett az akadálymentes pálya megtervezésének lehetőségét.*

A tételben és altézisekben előforduló új kifejezések definíciói:

Definíció: *Lokalizációs hibaterkép (LEF): Egy olyan kétváltozós skaláris függvény [$\varepsilon=f(x,y)$], amely az adott síkbeli munkaterület minden egyes (x, y) koordinátákkal megadott pontjához –egy hibafüggvény segítségével-, a „z” koordinátán megadja a kiválasztott markerpártól mért távolságok lokalizációs bizonytalanságát.*

Definíció: *Navigációs terület (NA) a csökkentett szabad terület (AFS) azon x, y koordinátákkal meghatározott pontjainak halmaza, ahol a lokalizációs hiba (ε) a **megengedett maximális lokalizációs hibánál** (ε_{\max}) kisebb vagy vele egyenlő. $\{\varepsilon \leq \varepsilon_{\max}\}; \{NA \subseteq AFS \subseteq FS \subseteq WS\}$ ¹³.*

Definíció: *Legyen az összefüggő navigációs terület jelölése: \mathcal{NA} . Ekkor, \mathcal{NA} bejárható az R mobilrobot számára, ha: $(\forall x, y \in \mathcal{NA})$ -ra érvényes, hogy bármely x , bármelyik másik y -nal (ahol $x \neq y$), összeköthető úgy, hogy az összekötő egyenes/görbe minden egyes pontja eleme lesz, \mathcal{NA} -nak, továbbá, -amennyiben nem pontszerű mobilrobottal dolgozunk-, érvényesnek kell lennie: $d(\overline{\mathcal{NA}}^{(i)}, \overline{\mathcal{NA}}^{(i+1)}) > 2r$, ahol „ r ” a mobilrobot köre írt kör sugara.*

III.1.1. A tétel-1 bővebb kifejtése

Egy önállóan közlekedő mobilrobot pontos lokalizációjában, nagy szerepe van az előre meghatározott pontoktól (*marker*) való távolságmérésnek. Ennek a mérésnek a lehető legpontosabbnak kell lennie, hiszen ez alapján kerül megállapításra az eltérés a tervezett útvonaltól majd ennek korrigálása, és a továbbiakban ez a mérés az alapja az összes többi navigációs számításnak. Ismert lokalizációs szenzorrendszer és markerelrendezés esetében elkészíthető a munkaterület *lokalizációs hibaterképe*. Ezt tartalmazza a tétel első fele. A második fele egy algoritmust ír le, amely algoritmus a *felhasználó által megkövetelt lokalizációs pontosság* figyelembevételével definiálja azt a területet, ahol ez a követelmény teljesül.

III.1.1.a. A tétel 1.1 bővebb kifejtése

Ebben az altézisben egy mesterséges markerrendszerrel ellátott, digitalizált munkaterület matematikai modelljén keresztül vizsgálom a távolságmérési hibákra vonatkozó pontossági feltételeket. A távolságmérés eszköze egy adott relatív/abszolút hibával rendelkező, a mobilrobotoknál elterjedten használatos rotációs mérőfej.

A felállított szimulációs rendszerben, az előző fejezetben (II.1. fejezet) leírt rotációs mérőfej rendszeres hibái kerülnek elemzésre. Az elemzés, kisebb módosításokkal¹⁴, más típusú szenzorrendszerre is alkalmazható. A hibafüggvény, a pozicionálási hibákból adódó lokalizációs hibaterület nagyságával arányos.

$$H^{(i,i+k)} = \left(\int_{x_1}^{x_3} g_{i(j)}(x) dx + \int_{x_3}^{x_4} g_{i+k(j)}(x) dx \right) - \left(\int_{x_1}^{x_2} g_{i(j+1)}(x) dx + \int_{x_2}^{x_4} g_{i+k(j+1)}(x) dx \right);$$

¹⁰ prof. dr. Lantos Béla, prof. dr. Somló János

¹¹ prof. dr. Szirmay-Kalos László

¹² dr. Vajta László

¹³ FS- szabad terület, AFS – csökkentett szabad terület, WS - munkaterület

¹⁴ más szenzorrendszer \Rightarrow más hibafüggvény (az általánosításra utal)

ahol, $i, k = \{1, \dots, \text{max. markerszám}\}$, $j = \{1, \dots, 4\}$,

Az első altézis további témái:

- 1.1 A felállított hibafüggvény helyességének igazolása, és annak elemzése.
- 1.2 A mérés peremfeltételeinek megállapítása, vagyis hogy, milyen határok között lehet az adott hibafüggvénnyel dolgozni.
- 1.3 A hibaterület alakjára és nagyságára vonatkozólag a lehetséges illesztések vizsgálata az egyszerűbb területmodell-számolás érdekében (paralelogrammával való helyettesítés).

$$H_r^{(i,j+k)} = \frac{\mu_i \mu_{i+k}}{\sin \beta} = \frac{(\pm \rho_i) \cdot (\pm \rho_{i+k})}{\sin \beta},$$

- 1.4 Megvalósítottam egy számítási szimulációs rendszert, amely a kifejlesztett hibafüggvény alapján, elkészíti egy tetszőleges konfigurációjú munkaterület lokalizációs hibatérképét (LEF).

Ezeknek az ismereteknek a birtokában készült el az első altézis eredménye, amely egy tetszőleges munkaterület modelljének, digitalizált lokalizációs hibatérképe (LEF = Localization's Error Field), ami egy pontszerű mobilrobot-modell esetében egy szenzorrendszer megadott távolsághibájából kiindulva megadja a munkaterület szabad tereihez tartozó mindenkori maximális bemérési pontosságot, és a hozzá tartozó marker-párost is. A LEF elkészítése a hibafüggvény megfelelő módosításával bármilyen szenzorrendszerre megvalósítható.

Az altézissel kapcsolatos saját publikációválogatás

- [T11-1] I. Nagy, L. Vajta, Cs. Gürtler: "Vision based navigation for multi-agent mobile robot system in the transport domain" / Proc. INES 97, IEEE Int. Conf., Budapest, 1997.
- [T11-2] I. Nagy, L. Vajta: „Trajectory Planning Based on Position Error Analysis and Fault Area Modeling” /Proc. ICAR2001, IEEE Int. Conf. Hungary, Budapest, 2001.
- [T11-3] I. Nagy: „Marker-Based Mobile Robot Positioning in Respect of Displacement of the Markers”, /Proc. INES'02, IEEE, Int. Conf. on Int. Eng. Systems, pp 63-68, (Opatija), Croatia, 2002./
- [T11-4] I. Nagy, A.L. Bencsik: “Fault Analysis of Mobile Robot Positioning in Respect of Amount and Displacement of the Markers”, /Proc. RAAD '02, International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, (Balatonfüred) Hungary 2002.
- [T11-5] Nagy I.: „Mobilis robotok pozíciómérési hibaelemzése a markerszám és a markerelhelyezés figyelembevételével (Senator és LabRador projektek)” /Hungelektro 2002, Nemzetközi Elektronikai Tehnológiai Szakkiállítás és Konferencia, 2002. ápr. 23-25, Programfüzet, CD-ROM/
- [T11-6] I. Nagy, könyvfejezet: „Intelligent Systems at the Service of Mankind”, Volume 1, ISBN 3-935798-25-3, pp.:99-109, cikk: „Marker-Based Mobile Robot Positioning in Respect of Displacement of the Markers”, Publisher: Ubooks, Germany, 2004.

III.1.1.b. A tézis 1.2 bővebb kifejtése

Ebben az altézisben egy új, a felhasználó által megadott helyzet-bemérési pontosságra vonatkozó követelményrendszerből definiált terület kerül bevezetésre.

Az altézis egyik bemenő függvénye a felhasználó által definiált maximális lokalizációs hiba ($\varepsilon_{\max(i)}$), míg a másik, az előző altézis kimenete, a lokalizációs hibatérkép (LEF= ε). Mivel a hibafüggvények ugyanarra a munkaterületre vonatkoznak, egymásra illesztésükkel, megkapom kölcsönös helyzetüket. Ebből, a továbbiakban meghatároztam az adott csökkentett munkaterületre (AFS) vonatkozó összefüggő navigációs területet (NA), illetve a navigációra nem alkalmas hibazónákat, (E-Zone).

$$\forall x, y \in \text{AFS ahol } i \neq j : \begin{cases} \varepsilon \leq \varepsilon_{\max(i)}; & \text{Pályatervezésre alkalmas terület : NA} \\ \varepsilon > \varepsilon_{\max(j)}; & \text{Pályatervezésre alkalmatlan területek : E - Zone} \end{cases}$$

Az altézissel kapcsolatos saját publikációválogatás

- [T12-1] Nagy, L. Vajta: „Trajectory Planning for Multi-agent System Based on Traffic Density and Position Error Analysis” /Proc. INES 2000., pp: 261-265, IEEE Int. Conf. (Portoroz) Slovenia, 2000.
- [T12-2] I. Nagy, A.L. Bencsik: „Model-Based Path Planning Algorithm in Respect of the APF and AEF of the Environment”, /Proc. INES'03, IEEE Int. Conf. On Int. Eng. Systems, pp: 551-556, vol. 2., (Assiut-Luxor) Egypt 2003.
- [T12-3] I. Nagy: „Path Planning Algorithm, Based on User Defined Maximal Localization Error” / Periodica Polytechnica, BUTE, Hungary, 2005.

III.2. Második tézis

Tézis 2: Új, súlyozott, irányított gráfok létrehozására alkalmas eljárást fejlesztettem ki, amelynek kiinduló bázisa a munkaterület összefüggő navigációs területe (NA) és eredménye egy súlyozott-irányított gráf, ahol az élek súlyozását a felhasználó igényei alapján összeállított polinom segítségével, míg a csomópontok súlyozását a csomópontok felbontásából határoztam meg. Az egyes útvonalak bonyolultsági fokát az élek és a csomópontok végleges súlyértékeinek összeadásával állapítom meg.

Definíciók:

Szakaszvégpont: (Gráf csomópont) Egy szakasz kezdeti vagy végpontja, vagy két szakasz találkozásánál az első szakasz végpontja, amely egybeesik a második szakasz kezdeti pontjával.

Elágazási pont: (Gráf csomópont) Kettőnél több szakasz találkozási pontja.

Él: (Gráf él) Két szakaszvégpontot vagy szakaszvégpontot és elágazási pontot vagy két elágazási pontot összekötő egyenes.

III.2.1. A tézis-2 bővebb kifejtése

A mobilrobot-technikában alkalmazott súlyozott gráfok a súlyozást általában az útszakasz hosszával kapcsolatban állapították meg, ami a dinamikai tulajdonságok mellőzését eredményezte [4].

Ebben a tézispontban kifejtettem, hogyan lehet figyelembe venni a lehetséges útvonalak dinamikai tulajdonságait a munkaterületre felépített irányított gráf csomópontjainak felbontásával. Mivel az irányított gráf, az előző tézis eredményeképpen kapott összefüggő navigációs területre épül, így a munkaterület valóságosan is bejárható útvonalait tartalmazza súlyozott gráf formájában. Innét ered a „gráf-térkép” elnevezés.

Az általam létrehozott gráf-térkép formális matematikai leírása:

$$H = \langle \{M_1, M_2, G\}, C \rangle;$$

ami alapján, ez egy hibrid térkép (H), amely két metrikus (geometriai) térképből (M_1, M_2), és egy (G) topológiai térképből tevődik össze. Ahol M_1 a munkaterület geometria, M_2 az \mathcal{NA} geometriai térképe, a C pedig az egyes térképek közti kapcsolatot jelképezi. A G topológiát az \mathcal{NA} terület(ek), *Voronoi* diagrammjának szakaszosításával kaptam.

Az élek súlyozása – Az eddigi súlyozott gráfokkal szemben, ahol általában csak az élek hosszát súlyozták, és ezzel mellőzték, pl. a munkaterület specifikációjából származtatható lokalizációs gyakoriság, forgalomsűrűség figyelembevételét, én az élek súlyozására egy *többszörös kifejezést* használok, melynek taglétszáma a felhasználó optimalizációs feltételeinek (vagy a munkaterület specifikumainak) megfelelően változhat. Először megállapítandó, hogy milyen *optimalizálási feltételek*, számítanak a súlyozásnál, (ezek lesznek a polinom tagjai), majd minden taghoz rendelék egy tényezőt ($w_{(n)}$), ami azt fejezi ki, hogy az egyes tagok milyen mértékben számítanak bele az adott él végleges súlyozásába. A megértés érdekében vegyük pl. az $S_{(ij)}$ él súlyozását. Legyenek a felhasználó által megszabott optimalizációs feltételek: az útvonalhossz ($S_{(ij)L}$), a lokalizáció gyakorisága ($S_{(ij)ARe}$) és a forgalomsűrűség ($S_{(ij)TrD}$). Ekkor egy él súlyozására a következő összefüggés írható:

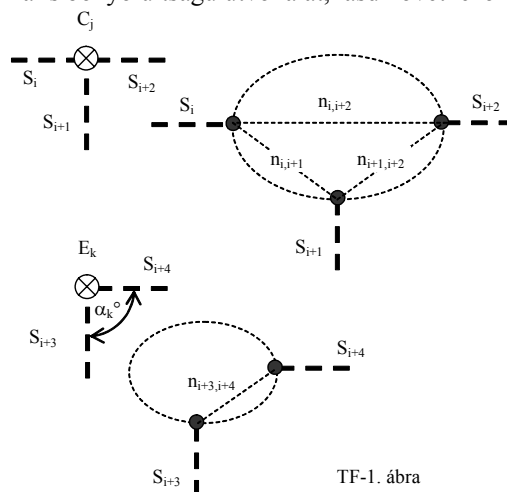
$$Ws_{(ij)} = w_1 S_{(ij)L} + w_2 S_{(ij)ARe} + \dots + \dots + w_{(n)} S_{(ij)TrD}$$

A csomópontok súlyozása – A gráf csomópontok alatt az egyes szakaszvégpontokat, illetve elágazási pontokat értem. Az eddigi gráfokban azzal, hogy nem vették figyelembe a két egymást követő él közti bezárt szöget, mellőzték a gráf-útvonal „dinamikai” tulajdonságát. Vagyis az útvonaltervezésben nincs figyelembe véve az útvonal *bonyolultsága*, ami alatt a kanyarok gyakoriságát és élességét értem. Ennek figyelembe-vételére dolgoztam ki az alábbi eljárást. **Felbontottam a gráf-csomópontokat** az alábbi ábra szerint (lásd TF-1 ábra) és kiszámítottam az „ n ”-el jelzett köztes szakaszok súlyozását. Így, egy-egy *elágazási pontnak többszörös súlyozása* lett, melyből a végleges súlyozás az útvonaltervezés során (a fordulás élességétől függően) alakul ki. A köztes szakaszok súlyozása, két egymást követő szakasz közti bezárt szögből (α) adódik a következőképpen.

Legyen az α szög értelmezési tartománya $[0^\circ, 180^\circ]$ között. Érvényesülnie kell a feltételnek, hogy minél élesebb a kanyar (kisebb a bezárt szög), annál nagyobbak kell lennie a súlyozásnak és az egyenes továbbhaladáskor a súlyozás legyen nulla. Ebből kifolyólag a J . csomópont n -el jelzett köztes szakaszának súlyozása, amennyiben az α szög már ismert:

$$W_{n(J)} = w_n |180 - \alpha_{(i,j)}^\circ|$$

ahol az i, j indexek a csomópontba bemenő, illetve kimenő szakaszok indexei. Az élek és csomópontok súlyozása után, egy költségfüggvény segítségével, kiszámítom a *start* és *cél* koordináták között lévő összes lehetséges útvonal súlyát, melyekből a minimális választva megkapom a minimális bonyolultságú útvonalat, lásd következő fejezet –III.3.



A tézissel kapcsolatos saját publikációválogatás

- [T2-1] I. Nagy, L. Vajta, Cs. Gürtler: "Trajectory Planning for Mobile Robots Based on Dynamical Models" / Proc. INES 97., IEEE Int. Conf., Budapest, 1997.
- [T2-2] I. Nagy L. Vajta: „Local Trajectory Optimization Based on Dynamical Properties of Mobile Platform”, /Proc. INES’01, IEEE, Int. Conf. on Intelligent Eng. Systems, pp 285-290, (Helsinki) Finland 2001.

III.3. Harmadik tézis

Tézis 3: Új, lágygörbéken (B-spline) alapuló pályatervező algoritmust fejlesztettem ki, amely a felhasználó által megadott optimalizációs követelmények alapján kiválasztott gráf-bejárási útvonal mentén megtervezi azt a bejárando trajektóriát, amely a feladat-végrehajtás sebességének és biztonságának szempontjából az optimum-közeli megoldást adja oly módon, hogy meghatározásának feltétele, hogy a bejárando, már pontosított, útvonal minden egyes pontja az összefüggő navigációs területen belül maradjon, és biztosítsa a mobilrobot folyamatos mozgását -a szélsőséges lineáris és szöggyorsulási értékek kiküszöbölésével-, az eddig elterjedt „szaggatott” mozgást eredményező eljárásokkal szemben.

III.3.1. A tézis-3 bővebb kifejtése

A lágygörbéken alapuló pályatervezés már több publikáció [5] témájában megjelent, de napjainkban mintha kicsit a háttérbe szorult volna. Ennek ellenére különösen fontos lehet a mobilrobot szélsőséges szöggyorsulásainak kiküszöbölése és a mozgás dinamikájának javítása szempontjából. A számítógépes grafika és az animáció fejlődése új teret nyitott az ilyen típusú pályatervezésekben.

A költségfüggvény számolása

Legyen $S, C \in \mathcal{NA}$, ($S \neq C$) ahol S a kiindulási és C a célkoordináta. Megkeresem az S -ből és a C -ből látható gráf-csomópontokat ($SG_{(g)}$, $CG_{(h)}$), összekötöm őket S -nek ($SSG_{(g)}$) és C -nek ($CCG_{(h)}$) megfelelően, majd elvégzem e szakaszok súlyozását:

$$w_{(g)}SSG_{(g)} = w_{(g)}SSG_{(g)}L + w_{(g)}SSG_{(g)}ARe;$$

$$w_{(h)}CCG_{(h)} = w_{(h)}CCG_{(h)}L + w_{(h)}CCG_{(h)}ARe;$$

ahol g az S -ből látható gráf-csomópontok, és h a C -ből látható gráf-csomópontok számai. Az $SG_{(g)}$ és $CG_{(h)}$ pontok között kialakul egy *útvonalhálózat*, mely egy irányított gráf ($SG_{(g)} \rightarrow CG_{(h)}$). A kialakult $SG_{(g)}$ és $CG_{(h)}$ csomópont-párok között kiszámolható az összes lehetséges útvonal költségfüggvénye, melyeknek értékeit egy $g \times h \times k$ dimenziójú *útvonalhálózat-mátrixba* foglalom, ahol k a két pont között lévő lehetséges útvonalak száma. Ebből a minimálist választva, megkapom az SG_{min} , ill. CG_{min} csomópontokat, melyek között található az útvonalhálózat minimális költségű útvonala. Ezek után egy adott k útvonalra vonatkozólag a költségfüggvény kiszámítása a következő:

$$KF = w_{(g)}SSG_{(g)} + w_{(h)}CCG_{(h)} + \left(\sum_i WS_{(i)} + \sum_J Wn_{(J)} \right)_k$$

Az útvonalhálózat szakaszainak
illetve csomópontjainak súlyozása
adot 'k' esetében

Az optimalizációs feltételeknek megfelelően a végleges útvonal kiválasztása ezen a gráf-rendszeren történik.

A biztonságos útvonal megszerkesztése:

Arra törekszem, hogy a legrövidebb úton jussak el az \mathcal{NA} középvonalára fektetett útvonalhálózatig. Ennek megfelelően a felírható költségfüggvény:

$$KF_{bizt} = \underbrace{\min(w_{(g)}SSG_{(g)})}_{\text{Az S-ből, ill. C-ből legrövidebb útvonalak az útvonalhálózatig}} + \underbrace{\min\left(\sum_i WS_{(i)} + \sum_J Wn_{(J)}\right)}_{\text{Az } SG_{(g)} \text{ és az } SG_{(min)} \text{ közti legrövidebb útvonal}}_{SG_{(g)} \rightarrow SG_{(min)}} +$$

$$+ \underbrace{\min\left(\sum_i WS_{(i)} + \sum_J Wn_{(J)}\right)}_{\text{A } CG_{(h)} \text{ és a } CG_{(min)} \text{ közti legrövidebb útvonal}}_{CG_{(h)} \rightarrow CG_{(min)}} + \underbrace{\left(\sum_i WS_{(i)} + \sum_J Wn_{(J)}\right)}_{\text{Az } SG_{(min)} \text{ ill. } CG_{(min)} \text{ közti útvonal szakaszainak ill. csomópontjainak súlyozása}}_{SG_{(min)} \rightarrow CG_{(min)}}$$

A gyors útvonal megszerkesztése:

Minél gyorsabban az $SG_{(min)}$ ill. $CG_{(min)}$ gráf-csomópontokba akarok jutni (láthatóság elve alapján).

$$KF_{gyors} = \underbrace{w_{(g)}SSG_{(min)} + w_{(h)}CCG_{(min)}}_{\text{S-ből, ill. C-ből } SG_{(min)} \text{ ill. } CG_{(min)}\text{-ig meghúzott láthatósági szakaszok súlyozása}} + \underbrace{\left(\sum_i WS_{(i)} + \sum_J Wn_{(J)}\right)}_{\text{Az } SG_{(min)} \text{ ill. } CG_{(min)} \text{ közti csomópontok szakaszainak ill. csomópontjainak súlyozása}}_{SG_{(min)} \rightarrow CG_{(min)}};$$

A görbe szerkesztése:

A görbét az optimalizációnak megfelelően kiválasztott gráf-útvonalra szerkesztem oly módon, hogy a görbe átmenjen az útvonal csomópontjain, vagyis biztonságos útvonal esetében a KF_{bizt} alapján kiválasztott gráf-útvonal csomópontjain, gyors útvonal esetében, a KF_{gyors} alapján kiválasztott gráf-útvonal csomópontjain. *Feltételek:*

- tartalmazza az S és C pontokat: $S, C \in b(t) \in \mathcal{NA}$;
- átmenjen a kiválasztott gráf-útvonal csomópontjain

- minimálisan C^2 folytonos legyen
- maradjon az \mathcal{N} területen belül, vagyis: $(\forall x,y \in b(t)) \in \mathcal{N}$

Legyen adott a lágygörbék a következő kifejezéssel:

$$b(t) = \sum_{j=0}^m b_j N_j^d(t)$$

Legyenek a görbe konfigurációs pontjai a kiválasztott gráf-útvonal gráf-csomópontjai, melyekre megszerkesztem a görbét. Vagyis keresem a $p_i(t)$ függvényt, egy harmadrendű polinom formájában:

$$p_i(t) = a_{3i} \cdot (t-t_i)^3 + a_{2i} \cdot (t-t_i)^2 + a_{1i} \cdot (t-t_i) + a_0 = ? \quad \text{ha } t_i \leq t \leq t_{i+1};$$

ahol az „a” interpolációs együtthatók az ismeretlenek. Bevezetve $T_i = t_{i+1} - t_i$ egyszerűsítést, felírható:

$$p_i = p_i(t_i) = a_0$$

$$p_{i+1} = p_i(t_{i+1}) = a_3 T_i^3 + a_2 T_i^2 + a_1 T_i + a_0$$

$$p_i' = p_i'(t_i) = a_1$$

$$p_{i+1}' = p_i'(t_{i+1}) = 3a_3 T_i^2 + 2a_2 T_i + a_1$$

ahol p_i' deriváltak a sebességek, t_i pedig az időpontok. Hogy a C^2 folytonosság teljesüljön, érvényesnek kell lennie: $p_k''(t_{k+1}) = p_{k+1}''(t_{k+1})$

Ezekből felírható a következő egyenlőség:

$$T_{k+1} p_k' + 2(T_k + T_{k+1}) p_{k+1}' + T_k p_{k+2}' = 3 \left[\frac{T_k}{T_{k+1}} (p_{k+2} - p_{k+1}) + \frac{T_{k+1}}{T_k} (p_{k+1} - p_k) \right]$$

ahol $k = \{1, \dots, n-2\}$, de az ismeretlenek száma $i = \{1, \dots, n\}$. Viszont ha ismerjük a görbe kezdő és végsebességét ($p_0'(t_0) = v_{start}$, $p_{n-1}'(t_n) = v_{end}$), akkor az ismeretlenek száma kettővel csökken, így az egyenletrendszerünk egyértelművé válik.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & & & & \\ T_1 & 2(T_0 + T_1) & T_0 & 0 & \dots & & \\ 0 & T_2 & 2(T_1 + T_2) & T_1 & 0 & \dots & \\ \dots & & & & & & \\ \dots & 0 & T_{n-1} & 2(T_{n-1} + T_{n-2}) & T_{n-2} & & \\ \dots & & & \dots & 0 & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0' \\ p_1' \\ p_2' \\ \dots \\ p_{n-1}' \\ p_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{start} \\ 3[T_0/T_1(p_2 - p_1) + T_1/T_0(p_1 - p_0)] \\ 3[T_1/T_2(p_3 - p_2) + T_2/T_1(p_2 - p_1)] \\ \dots \\ 3[T_{n-2}/T_{n-1}(p_n - p_{n-1}) + T_{n-1}/T_{n-2}(p_{n-1} - p_{n-2})] \\ v_{end} \end{bmatrix}$$

Kiszámítva a p_0', \dots, p_n' ismeretleneket, és visszahelyettesítve a kiinduló polinomba, kiszámolhatom a görbe vezérlőpontjait és definiálhatom a görbét.

A tézissel kapcsolatos saját publikációválogatás

- [T3-1] I. Nagy: “Off-line Mobile Robot Path Planning Process with Given MLE and Constructing the Safety Final Route”, Proc. of the INES2005, IEEE Int. Conf. on Intelligent Engineering Systems, ISBN 0-7803-9474-7 (+CD), pp: 279-282, Greece, (Athen) 2005.
- [T3-2] I. Nagy, A.L. Bencsik: “A Global Path Planning Algorithm, Based on Maximal Localization Error”, /Proc. Jubilee Conf., Science in Engineering, Economics and Education, (Budapest) Hungary 2004.
- [T3-3] I.Nagy: “Genetic Algorithms Applied for Potential Field Building in Multi-Agent Robotic System”, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Computational Cybernetics, ICC2003, ISBN 963-7154 18 4 (+CD), pp: 105-108, Hungary (Siófok) 2003.
- [T3-4] I. Nagy, A.L. Bencsik: „A Simulation System for Behavior-based Potential Field Building in Multi-Agent Mobile Robot System”, Proc. of the 3rd IAESTED International Conference on Computational Intelligence, ISBN: 978-0-88986-672-0, (+CD), pp: 7-12, Canada (Banff-Alberta) 2007.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] I. Kamon, E. Rimon, E. Rivlin: *Tangent Bug: A Range-Sensor-Based Navigation Algorithm*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 17, No. 9, pp. 934-953, 1998.
- [2] T. Lozano-Perez : *Spatial planning: a configuration space approach*, in IEEE Trans. on Computers 32/1983.
- [3] P. Moutarlier, B. Mirtich, J. Canny: *Shortest Paths for a Car-like Robot to Manifolds in Configuration Space*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 1, pp. 36-60, 1996.
- [4] G. Tan, D. Mamady I: *Real-Time Global Optimal Path Planning of Mobile Robots Based on Modified Ant System Algorithm*, ICNC 2006, Part II, LNCS 4222, pp. 204 – 214, 2006, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [5] M.B. Kobilarov, G.S. Sukhatme: *Near time-optimal constrained trajectory planning on outdoor terrain*, Robotic Embedded Systems Laboratory Center for Robotics and Embedded Systems University of Southern California, Los Angeles, IROS 2004.
- [6] G. K. Kraetschmar, S. Enderle: *Self-localization using sporadic features*, Robotics and Autonomous Systems 40, pp. 111–119, 2002.
- [7] U.D. Hanebeck, G. Schmidt: *Localisation of Fast Mobile Robots Based on an Advanced Angle-Measurement Technique*, *Control Eng. Practice*, Vol. 4, No. 8, pp. 1109-1118, Copyright © Elsevier Science Ltd., 1996.
- [8] J.Peters, D.Lutterkort: “*Smooth Path in Polygonal Channel*”, Proc. of the 15. Annual Symposium on Computational Geometry, Miami Beach, Florida, USA, 1999.
- [9] Szirmay K.L., Antal Gy., Csonka F.: *Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés –Animáció–*, Computer Books, Budapest, 2008.