

# Hibrid és lágy számítási módszerekre épülő intelligens navigációs modellek és algoritmusok

Szakmai zárójelentés

OTKA Nyilvántartási szám: T 035190  
Témevezető neve: Várkonyiné Kóczy Annamária  
A kutatás időtartama: 2001-2004

## Bevezetés

Az ipari alkalmazásokkal párhuzamosan egyre erősödő igényként merül fel az autonóm robotok alkalmazása, elsősorban ott, ahol szükségessé válik a közvetlen emberi beavatkozás kiváltása, mert a humán jelenlét valamilyen szempontból veszélyes vagy fizikailag lehetetlen. Az ilyen eszközökkel szemben elvárt a nagyfokú autonómítás és a környezet változásaira való kellő adaptivitás. Ennek elvi lehetőségét nyilvánvalóan a beépíthető, szinte korlátlan rendszer ismeret és számítási kapacitás adja. Ugyanakkor a pályázat kutatási programja az intelligens rendszerekben alkalmazott modellekhez és algoritmusokhoz kapcsolódóan olyan helyzetekben is működőképes megoldásokra irányult, amikor a környezet ismeretlen volta, a pontos matematikai modell hiánya, vagy kezelhetetlen mértékű bonyolultsága, idő- és/vagy adathiány miatt a konvencionális eljárások alkalmazása nem, vagy csak igen komoly korlátok között vezethet eredményre. A pályázat célkitűzései elsősorban az autonóm navigációval rendelkező eszközök tervezése és működése során felmerülő kérdések vizsgálatára irányult.

Egy ilyen két vagy három dimenziós mozgást végző eszköz fontos jellemzője, hogy autonóm mozgásra képes intelligens döntések alapján. Ennek megvalósítása több szempontból is nehéz, egymásnak ellentmondó követelményeket kell egyszerre kielégíteni. Az egyik szempont a felépítésből adódik, szeretnénk, ha az eszköz minél nagyobb intelligenciával rendelkezne. Ugyanakkor az intelligenciát valamilyen számításra alkalmas eszközön (tipikusan számítógépen) kell megvalósítani, ami az erőforrás végeessége miatt korlátokat szab a realizálható intelligenciának. Az emberi és gépi intelligencia illesztése is hangsúlyos feladat. A közlekedést irányító algoritmusnak elsősorban intelligens döntéshozásra és adaptivitásra képesnek kell lennie, bár az esetek egy részében a valós idejű működés is elvárás. További lényeges követelmény, hogy egy korábbi helyzetben megtanult tudást képes legyen megváltozott körülmények között is megbízhatóan alkalmazni. A felmerülő alkalmazások többségében a robotok be vannak ágyazva valamely komplex rendszerbe. A mozgást irányító algoritmus mellett az esetek jelentős részében ugyanazon a számítási eszközön, szimultán működtetve további feladatokat is meg kell oldani. A különböző alkalmazási területek eltérő mozgás stílusok megvalósítását igényelhetik.

Mindezek a nagybonyolultságú és elosztott rendszerek modellezése és irányítása során egyre inkább elterjedő intelligens - anytime és lágy számítási módszereken, ez utóbbin belül is fuzzy logikán és neurális hálózatokon alapuló -, a tudást lehetőleg problémafüggetlen módon ábrázolni képes technikák vizsgálata és alkalmazása felé fordította a figyelmünket. A kutatás során négy, a téma szempontjából jelentős komoly nemzetközi érdeklődéssel kísért területen jelöltünk ki célokat:

1. A környezet változásaihoz adaptívan alkalmazkodni tudó, autonóm, a tudást probléma független módon ábrázolni képes, "anytime" jellegű működést is lehetővé tevő robotjárművek modelljei és navigációs algoritmusai területén
2. Számítási komplexitást csökkentő redukciós megoldások és modell-approximációs technikák területén
3. Az anytime működésből adódó modell újrakonfigurálásból következő tranziens viselkedés területén
4. Az autonóm navigáció komplex, szimulációs környezetbe illetve valós rendszerbe történő beágyazási lehetőségeinek területén

### **Az elért eredmények**

## LÁGY SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREKEN ALAPULÓ NAVIGÁCIÓS ALGORITMUSOK ÉS DINAMIKUS JÁRMŰ-MODELLEK

Autonóm navigációt végző robotok használatára igen eltérő alkalmazási területeken merül fel igény. Mindez azt eredményezi, hogy a két- vagy háromdimenziós mozgást végző eszközök eltérő mozgás stílusok megvalósítását igényelhetik. Az alapstílusok (pl. óvatos – középre tart, lopakodó – jobbra, balra közelít) mellett ezek kombinációi, illetve más robotok stílusának megtanulása, másolása is felmerül a célok között. Mindez intelligens döntéshozási képességet, adaptivitást, a megszerzett tudás új körülmények között való alkalmazási képességét és valós időben történő működést feltételez. Az egységes kezelés érdekében olyan univerzális modellezési technika, algoritmus leírási mód alkalmazása kívánatos, amely egységesen képes leírni és kezelni az eltérő elvárásoknak és körülményeknek megfelelni kívánó navigációs eszközöket. Ezért kedvező tulajdonságai – robusztusság, flexibilitás, tanulóképesség, alacsony számításigény – miatt elsősorban a mesterséges intelligencia és lágyszámítási módszerekre épülő eljárásokat és módszereket vizsgáltuk.

A területen kidolgoztunk egy olyan – az irodalomból ismert potenciálfelület alapú vezérlés általánosításának tekinthető – vektormezőalapú globális navigációs modellt, amely lehetővé teszi a különböző vezetési stílusok egységes leírási módját és kezelését valamint kiküszöböli a potenciál alapú vezérlés egyik alaphibáját és így oszcillálás helyett képes párhuzamos folyosóban a fallal párhuzamosan egyenes mozgást megvalósítani [1], [2]. Javaslatot tettünk továbbá a robotok virtuális tanítását lehetővé tevő virtuális környezet (az ún. COSMOS rendszer) felépítésére és alkalmazására [7].

Kidolgoztunk egy univerzálisan alkalmazható – a körülményeknek megfelelően rendelkezésre álló lokális és/vagy globális információra épülő összetett – globális és lokális alrendszer integráló - navigációs sémát [26]. Ezenkívül javaslatot tettünk a globális útvonal tervezés egy optimális, a mesterséges intelligencia  $A^*$  algoritmusát alkalmazó megvalósítási módszerére [27].

A navigációs algoritmusok mellett vizsgálatainkat kiterjesztettük maguknak a roboteszközöknek a modellezésére valamint az azok stabilitását is biztosító vezérlésnek irányába. E területeken javaslatot tettünk egy a számítási komplexitás optimalizálását is lehetővé tevő, széles területen – navigáció, identifikáció, diagnosztika, vezérlés, stb. - univerzálisan alkalmazható numerikus közelítési eljárásra [23], valamint az ennek

általánosításaként felfogható, a rendszerről a priori ismeretek meglétét nem igénylő, tenzor szorzat alapú modellezési módszerre (illetve leírási módra) [20], [21]. A modellezési módszert kiterjesztettük a körülményekhez jobban alkalmazkodó anytime technikák irányába is [22], [39]. A javasolt modellezési eljárást szimulációs körülmények között alkalmaztuk egy oszcilláló és kaotikus mozgást is végző kísérleti flexibilis repülőgépszárny vezérlésére [40] illetve különböző jellegű stabilizálására [38], [35], [24]. Mindegyik esetben elvégeztük a modellek számítási komplexitás optimalizálását is. Az alkalmazott modellezési eljárás előnye egyebek között az is, hogy a vezérlő struktúrája megegyezik a vezérelt rendszer modell struktúrájával, így jól kézben tartható, valamint hogy a stabilitás biztosítása egy egyszerű egyenlőtlenség rendszer megoldására egyszerűsödik. Egy összetett ipari rendszer kapcsán azt is megmutattuk, hogy az ezen elvek alapján felépített modell várhatóan előnyösen alkalmazható a hibadetektálásban és hibaizolálásban is [37].

A vizsgálataink és a gyakorlati próbák során kiderült, hogy a robot navigációjához elengedhetetlenül szükséges „látás” (akadály észlelés, távolságbecslés, stb.) algoritmusainak minőségi javítása közvetlen hatással van a robot teljesítőképességére (akadályelkerülés megbízhatósága, biztonságos mozgási sebesség, reakciósebesség váratlan eseményeknél). Ezért kutatásaink egy másik vonulata a robot-látás és képfeldolgozás területére irányult. Olyan, elsősorban lágyszámítási eszközökön alapuló algoritmusokat és modelleket fejlesztettünk ki, amelyek az irodalomból ismert módszereknél előnyösebben használhatók a képfeldolgozás, modellezés és identifikáció területein. Javaslatot tettünk egy, a dinamikusan változó környezetre vonatkozó lokális információ gyűjtését megvalósító és azt az eddig alkalmazott módszereknél nagyobb biztonsággal feldolgozó látórendszerre [25]. Eredményeink közé sorolhatóak különböző 2D digitális képeknél alkalmazható előfeldolgozó és zajszűrő módszerek [51], új, fuzzy elveken működő él- és csúcspontdetektáló algoritmus [42], különböző képek azonos csúcspontjait egymásnak automatikusan megfelelő eljárások [52], [66], [65] valamint 3D modellező algoritmusok [50], [60], [43], [46], [47] kidolgozása.

Az inverz modellek a direkt modelleknél sok esetben előnyösebben alkalmazhatók a mérés-technika és vezérlés területén. Kutatásunk egy további iránya az alkalmazott, elsősorban lágyszámítási eszközökön alapuló modellek inverziójára irányult. A résztvevők korábban már publikáltak eredményeket fuzzy modell-inverzióval kapcsolatban, most az ott alkalmazott elveket neurális hálózatok inverziójára adaptáltuk, így sikerült egy, az irodalomból ismert inverziós technikáknál szélesebb körben alkalmazható, megfigyelő elven alapuló neurális hálózat inverziós stratégiát kidolgozni [59], [64].

## KOMPLEXITÁS CSÖKKENTŐ REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK ÉS MODELL-APROXIMÁCIÓS TECHNIKÁK

A navigációs stílusokat megvalósító valós időben történő működés komoly korlátokat szab az alkalmazható modellek és algoritmusok számítási komplexitásának. Ezért kiemelt fontossággal bír olyan közelítő eljárások találása, melyek az előző pontban felsorolt elvárások teljesítése mellett képesek megfelelő kompromisszumot találni a „pontosság” és „komplexitás” között. Vizsgálataink alapján a lágyszámítási módszerek – elsősorban a fuzzy és NN modellek – tűnnek alkalmas jelöltnek az erősen nemlineáris modellek és algoritmusok fenti célokat is megvalósító közelítésére. E modellek szinguláris érték felbontáson (SVD) alapuló számítási komplexitás csökkentése pedig az

optimális modellredukciót biztosíthatja. Egységes, tenzorszorzat alapú leírási módot adtunk a magasabb dimenziószámú SVD (HOSVD) alapú komplexitás csökkentésre [13]. A leírási módot mind fuzzy rendszerek, mind általánosított neurális hálók komplexitás redukálásánál alkalmaztuk [5], [6].

A pontosság és komplexitás közötti egyensúly meghatározásában kiemelt fontossággal bír a nem pontos kiértékelés vagy közelítés hibájának megadása. A szinguláris érték dekompozíció (SVD) alapuló számítási komplexitás csökkentési eljárásra az eddig használnál pontosabb felső hibakorlátot sikerült meghatároznunk [19], [73]. Kutatásaink során az SVD alapú komplexitás csökkentő eljárás hibakorlátját kiterjesztettük olyan fuzzy rendszerekre is, ahol a bemeneti fuzzy halmazok nemlineárisak [8]. Megadtuk az SVD eljárás algoritmusát és hibáját ún. „közel” PSGS (nem teljesül a Ruspini partíció feltétele) fuzzy rendszerekre [33]. Hibakorlátot adtunk olyan általánosított neurális hálózatok nem exakt komplexitás csökkentésére, ahol a kimeneti fuzzy halmazok nem szingletonok [9], [72].

Bemutattunk olyan eljárásokat is, amely új információ szerzés illetve több erőforrás rendelkezésre állása esetén komplexitás robbanás nélkül teszi lehetővé az eddig figyelembe nem vett illetve új információknak a már meglévő, különböző típusú, SVD és HOSVD alapú komplexitás csökkentéssel redukált modellekbe illetve algoritmusokba való beépítését és ezáltal pontosabb, finomabb modellek létrehozását. A módszerek új közelítési pontok beillesztését végzik el a számítási komplexitás optimális (minimális) szinten tartása mellett [5], [3], [12] [11], [55]. Ehhez kapcsolódóan SVD (HOSVD) alapú eljárást adtunk nemlineáris modellek adott hibájú közelítéséhez szükséges minimális számú linearizált modell meghatározására is [6], [4], [14].

A kutatás egy másik vonulata a javasolt modellezési technikának a pillanatnyilag rendelkezésre álló erőforrás és adatmennyiséghez flexibilisen alkalmazkodni képes anytime kiterjesztését vizsgálta. Az alapelveket és a lágyszámítási módszereken alapuló modellek és algoritmusok anytime jellegű működtetésénél javasolt moduláris architektúrára épülő intelligens keretrendszer alkalmazását a [10] és [74] irodalmakban írtuk le.

Anytime rendszerekben igen előnyösen alkalmazhatók az iteratív eljárások. A [15]-[18], [48], [58] irodalmakban egy olyan transzformációt mutatunk be, amely lehetővé teszi az ún. szingleton kimenetű product-sum-gravity (PSGS) fuzzy rendszerek iteratív kiértékelését valamint meghatározzuk a nem pontos kiértékelés hibáját illetve vizsgáljuk és bemutatjuk a transzformáció különböző vonatkozásait és gyakorlati alkalmazhatóságát.

A lágyszámítási eszközök anytime környezetbe való illesztése, a anytime rendszerkomponensek generálási lehetőségei, pontosabb hiba becslés, új, iteratív módon kiértékelhető modellek és eljárások területén elért eredményeinkből az [57] PhD dolgozat született.

A számítási idő (komplexitás) csökkentésének igénye nemcsak a navigációs modelleknél merül fel, hanem a navigációs döntéshez szükséges információgyűjtés és -előfeldolgozás során is. Ezért kutatásainkat kiterjesztettük a jel- és képfeldolgozás számítási idő igényének vizsgálatára is. Sikerült javasolnunk egy olyan Fourier

transzformációra illetve Fourier analízisre alkalmas approximációs technikát, mely segítségével már a jelperiódus negyedénél (vagy akár már hamarabb is) jó becslés adható az alapharmónikus komponens értékére. Ezzel sok esetben jelentősen lerövidíthető a döntés előkészítés ideje illetve gyorsabb reakció biztosítható a váratlan eseményeknél [53], [67], [70]. A módszer segítségével ismeretlen frekvenciájú jelek komponensei is pontosan becsülhetővé válnak a jel-periódus korai szakaszában [70].

## A MODELL ÚJRÁKONFIGURÁLÁSBÓL KÖVETKEZŐ TRANZIENS VISELKEDÉS VIZSGÁLATA

E területen az alapvető kutatási célunk az volt, hogy a változó - esetenként nem az elvárt módon viselkedő - környezethez illeszkedő, paramétereiben és/vagy struktúrájában adaptív jelfeldolgozó eljárások "átkapcsolási jelenségeit" vizsgáljuk a Tanszéken ez irányban megkezdett kutatások folytatásaként.

A modell alapú jelfeldolgozó struktúrák tranziens viselkedése terén a korábbi, egy sikeresen lezárt OTKA pályázat (T 026254) keretében megkezdett vizsgálataink olyan eredményekre vezettek, amelyeket iránymutatónak tekintettünk jelen vizsgálataink során is. Az ismert, modell alapú becslésnél előnyösen alkalmazható ún. predikciós-korrektív sémában a szükségessé váló korrekció mértékétől függ a bekövetkező tranziens. Azt is kimutattuk, hogy a tranziensek erősen struktúra függőek, és a modell alapú megközelítés ebből a szempontból is kedvező. A számítási lépések egy része bizonyíthatóan elhagyhatóvá válik, ha a számított korrekciós tag egy előírt korlát alatt marad. Kedvezőek azok a struktúrák, amelyek működésük közben a tárolt energiát egyenletesen osztják szét az állapotváltozóik között. Ilyenek az ún. ortogonális struktúrák. A tranziensek nagysága szempontjából meghatározó az alkalmazott struktúra skálázottsága. Ha az újrakonfigurálás során a belső állapotváltozókról történő kicsatolás nem változnak, akkor a kimeneti jelben ugrás nem lép fel. Másfajta skálázás tartozik a determinisztikus és a zaj jellegű bemenetekhez. A tranziens hatások minimalizálásához szükség van a tranziens okozó belső állapotváltozó értékek működés közbeni átírására abból a célból, hogy az átkapcsolás előtti állandósult állapotból közvetlenül az átkapcsolás utáni állandósult állapotba juttassuk őket.

Jelen OTKA pályázat keretei között elsősorban a lágyszámítási modellek vizsgálatára koncentráltunk. A fenti vizsgálatok eredményei alapján végeztük el a lágyszámítási eszközök, fuzzy és neurális modellek tranziens viselkedésének elemzését és a tranziensek szempontjából előnyös struktúrák bemutatását. Összehasonlító vizsgálatokat végeztünk hagyományos elvekre épülő és fuzzy illetve neurális modellek között. A szimulációs futtatások szerint tranziens viselkedés szempontjából is kedvezőek a lágyszámítási, elsősorban fuzzy modellek. Az újrakonfigurálás következtében fellépő tranzienseket különböző megközelítésben vizsgáltuk. A tranziens folyamatok sokfélesége miatt felvethető egy valószínűségi modellezés. A fuzzy leírási mód előnyös akkor is, amikor a szabályozási körben fellépő újrakonfigurálási tranzienseket úgy próbáljuk csökkenteni, hogy az alkalmazott szabályzó állapotváltozóját előírt stratégia szerint az átkapcsoláskor felülírjuk egy kisebb tranziens okozó értékre [10], [74]. Egy további módszer a kialakuló tranziens jelet ellenfázisban kioltó jel tervezését jelenti. Ehhez előzetesen vizsgálni (és tárolni) kell az egyes átkapcsolási eseteknél fellépő tranziens folyamatot, majd megfelelő időzítéssel kell a szabályozott szakasz és a szabályzó átkapcsolási jeléhez keverni [39], [37], [38], [35].

## AZ AUTONÓM NAVIGÁCIÓ KOMPLEX, SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBE ILLETVE VALÓS RENDSZERBE TÖRTÉNŐ BEÁGYAZÁSA

Ezen a területen két irányban folytattunk kutatást és értünk el eredményeket. Az első az eddig a valós gyakorlatban még nem alkalmazott, új megközelítésű, anytime technikák beágyazását lehetővé tevő környezet megteremtését célozta, míg a második az új navigációs technikák fejlesztését és vizsgálatát támogatja. Mindkét területen sikerült olyan hardware, ill. szoftver elemeket kidolgoznunk, amelyek lehetővé teszik a kifejlesztett algoritmusok beágyazását komplex rendszerekbe.

### Anytime technikák beágyazása

Ezen a területen célul tűztük ki, hogy az elméleti illetve a szimulációs vizsgálatok eredményeinek gyakorlati hasznosíthatósága érdekében olyan hardware, ill. szoftver elemeket is kidolgozunk, amelyek lehetővé teszik a kifejlesztett algoritmusok beágyazását komplex rendszerekbe. A témakörhöz kötődően kényszer bázisú, mesterséges intelligencia és "szoft" számítási módszereket alkalmazó intelligens felügyelő rendszerek ("futtató rendszer") vizsgálatával, elvi kidolgozásával és fejlesztésével foglalkoztunk, alapvetően három területen.

Kidolgoztunk egy általánosan alkalmazható moduláris felépítésű rendszer struktúrát, ahol az egyes modulokon belül a modul által megvalósítandó szolgáltatást többféle, egységes interfészű, de különböző paraméterekkel (komplexitás, igényelt futási idő, pontosság) jellemezhető egység valósítja meg. Egy-egy modulon belül az egyes, azonos interfészű, de különböző attribútumokkal jellemezhető egységek tehát ugyanannak a feladatnak a megvalósítására képesek, az intelligens felügyelő rendszer a pillanatnyi körülmények figyelembevételével választja ki a szükséges modul-feladat megvalósításához alkalmazni kívánt egységet, annak figyelembevételével, hogy az egész rendszerre teljesüljön valamely optimalitási kritérium. A struktúrával kapcsolatos eredményeink a [10], [74] publikációkban találhatóak meg. A mesterséges és lágyszámítási eszközök anytime rendszerekben való alkalmazhatóságának vizsgálatánál a moduláris architektúra mellett a – bár korlátozottan alkalmazható - de sok szempontból előnyösebb iteratív módszerekre is komoly hangsúlyt fektettünk [32].

Kutatásunk másik irányaként a dinamikus rendszerek egyik kritikus kérdésére, a hibaterjedés vizsgálatára koncentráltunk. A hibaterjedés jellegzetességeit mind időbeni, mind térbeli terjedés vonatkozásában vizsgáltuk. A hiba modellezéssel, hibabecsléssel és a hibahatások csökkentésével kapcsolatos eredményeinkről a [10], [68], [74] közleményekben számoltunk be.

Kutatásunk harmadik iránya az anytime működést lehetővé tevő anytime operációs rendszer illetve fordító fejlesztése és algoritmikus optimalizálása volt. A témában sikerült két területen eredményt elérnünk. Javaslatot tettünk egy olyan C nyelvű anytime fordítóra, amely lehetővé teszi a fejlesztett egységek számítógépes anytime futtató környezetbe való illesztését. A fordító jelenlegi fejlettségi szintjén arra alkalmas, hogy a C nyelven írt egy szálon futó rendszert leíró anytime forrásprogramot futás közben értelmezze és feldolgozza, az anytime és állandó részeket szétválassza, és a pillanatnyi körülményektől függő, aktuálisan végrehajtandó kódot generálja és beillesse a rendszerbe. A forrásprogramban adhatók meg a különböző modulok, a modulok összekapcsolása és a célok, melyek adatait az előfeldolgozás után (pl. kommentek

kiszedése) egy ún. „parser” egység megfelelő struktúrákba szervezi. Az „anytime compiler” tulajdonképpen anytime illesztőként működik, a kompozit modulok adatait a bemenethez hasonló objektumokba rakja valamint ütemezési és egyéb táblázatokat készít. A kódgenerátor a végső C forráskódot készíti el, felhasználva az operációs rendszert megadó C sablon bytekódját, amelyet egy „OS definition compiler” állít elő, annak nyelvi formátuma alapján (ez mondja meg, hogy hogy nézzen ki a végeredmény) [29], [31]. Az anytime rendszer gyakorlati működtetéséhez elengedhetetlen anytime operációs rendszert, erőforrás ütemezőt és a rendszer működését felügyelő intelligens monitort pedig két konferencia- [34], [30] és egy folyóiratcikk [54] mutatja be.

Az anytime operációsrendszer szoftver fejlesztése és megvalósítása mellett foglalkoztunk az intelligens felügyelő döntési algoritmusainak kidolgozásával és optimalizálásával is. A minőség és időigények alapján meghatározható, az egész rendszerre vonatkozóan a legnagyobb hasznossággal bíró idő- és egyéb erőforrás szétosztásra lokális és hierarchikus stratégiákat dolgoztunk ki, valamint az irodalomban megtalálható algoritmusokat továbbfejlesztettük és általánosítottuk [29], [30], [34], [54].

A 2. pontban már vázolt anytime modelleket és algoritmusokat bemutató publikációink mellett az e területen elért eredményeinket mutatja, hogy a témavezetőt 2003 óta rendszeresen felkérjük egy anytime és intelligens jelfeldolgozási PhD kurzus tartására az Algarve-i Egyetemen (Portugália) [36], [49], 2006-ban pedig az Alcala de Henares-i Egyetemen [69] is. Több konferencián és workshop-on tartott meghívott előadást vagy vezetett panel discussion-t (pl. [62], [63]).

## Szimulációk

Célunk volt olyan szimulációs környezet megteremtése, amely támogatást nyújt navigációs modellek és algoritmusok fejlesztésére, összehasonlítására és tesztelésére. A gyakorlati szimulációk során elsősorban a navigációs modellek javítására illetve tanulóképeségük/adaptivitásuk növelésére összpontosítottuk. Ennek keretében létrehoztunk egyrészt egy 2 dimenziós teszt- és fejlesztő eszközt, amelyen az univerzális navigációs modell két dimenziós változatát teszteltük. A kísérleti szimulációs rendszer 2D mozgást végző robot navigációs algoritmusok fejlesztését, ellenőrzését, optimalizálását, működésének követését teszi lehetővé egy robotkocsi (mozgás) és a vele rádiós kapcsolatban álló, html nyelven kommunikáló „távoli” számítógép (megjelenítés, parancsadás) segítségével [28]. A gyakorlati tapasztalatok alapján javítottunk a három dimenziós modell felépítésén is. A három dimenziós navigációs modell tesztelését a Japánban felépített COSMOS virtuális 3D szoba segítségével végeztük [7]. Az általunk kifejlesztett, a robot valós környezetének szenzorálását végző „látórendszer”-t a 2 dimenziós teszt- és fejlesztő eszköz robotkocsiján teszteltük.

Előzetes terveink között szerepelt a navigációs szimulációk 3D-s helikopter adaptációja is. E tervünkről azonban lemondtunk, mert egyrészt nem sikerült olyan helikopter modellt beszerezni, amely a céljainknak biztonságosan megfelelt volna (a kamera rendszer biztonságos hordozására is alkalmas kellően nagyméretű, robbanómotoros és a biztonságos tanuláshoz nélkülözhetetlen giroszkópos jármű). További problémát jelentett a gyakorlati kipróbáláshoz szintén szükséges helikopter dinamikai modelljének a felépítése. Ez utóbbi úgy érezzük túlnő jelen OTKA keretein, így végül megmaradtunk a feladatul kitűzött navigációs modelleknek és algoritmusoknak virtuális

valóság keretei között történő kipróbálásánál.

## EGYÉB, A KITŰZÖTT KUTATÁSHOZ LAZÁN KAPCSOLÓDÓ EREDMÉNYEK

Kutatásaink során a navigációhoz csak lazán kapcsoló, ám igen érdekesnek talált vonulat merült fel. A szűrésben, képfeldolgozásban, modellezésben, identifikációban, komplexitás optimalizálásban elért eredményeink alkalmazhatóságának sokrétűségét bizonyítja az az intelligens szakértői rendszer, amely járművek ütközésanalízisét célozza. Az összetett, lágyszámítási eszközöket (fuzzy logika, neurális hálózatok) és az epipoláris geometria módszereit is alkalmazó eszköz deformált járművekről készült fényképek alapján képes azt 3D-ben modellezni és az ütközés irányát és sebességét meghatározni. Az ezen OTKA keretei között elért előzetes eredményeinket egy PhD dolgozat [56], egy folyóiratcikk [71], három konferenciatick [44], [45], [41] és egy meghívott előadás [61] foglalja össze. A területen elért további eredményeink a jelen kutatástól függetlenek, egy 2005-ben szintén a témavezető vezetése alatt indult másik OTKA pályázat (OTKA T 49519) kereteihez kötődnek.

### Összefoglaló értékelés

A kutatás eredményeként sikerült javaslatot tenni

- Egy olyan univerzális leírási módra és navigációs modellre, amely mind ismert, mind pedig ismeretlen illetve dinamikusan változó környezetben képes az akadályok elkerülésére és adott cél megközelítésére. A leírási mód különböző stratégiájú, 2D és 3D-ben történő mozgás esetén is alkalmazható. A modell képes megtanulni és követni más robotok mozgásstílusát. Beágyazott alkalmazás esetén pedig képes anytime módon adaptívan alkalmazkodni a pillanatnyi idő és erőforrás elérési lehetőségekhez.
- Olyan univerzális komplexitás csökkentő és közelítő eljárásokra amelyek alkalmasak az adott körülmények között optimális modell felépítésére és a körülmények (információ, erőforrás mennyiség, minőségi követelmények) megváltozása esetén képesek flexibilisen alkalmazkodni, azaz a modell (közelítés) pontosságának az elvárásokhoz és a környezethez való illesztésére (a leírás pontosságának csökkentésére illetve javítására).
- Olyan struktúrákra és stratégiákra, amelyek kedvezőek a dinamikus rendszerek átkapcsolási jelenségeinek szempontjából, azaz alkalmasak a tranziensek minimalizálására.
- Anytime működést lehetővé tevő, programozási nyelvre, alacsony időigényű operációs rendszerre és futtatási környezetre.
- Két és három dimenziós navigációhoz kötődő szimulációs, teszt- és fejlesztő eszközökre.

A kifejlesztett eszközök és algoritmusok alkalmazhatóságát széles területről vett gyakorlati példákon mutattuk be (navigáció, kontroll, robotlátás, hibadiagnosztika, stb.).