

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Urbancsek Tamás

# **Korszerű irányítási architektúra multiágensű telerobotrendszerek tervezéséhez**

c. Ph.D. értekezés tézisei

Témavezetők: **Dr. Vajta László**, egyetemi docens  
**Prof. Dr. Arató Péter**, egyetemi tanár  
BME Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Budapest, 2009. december 21.

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Kitzűzött célok.....	5
3. Választott módszerek és eszközök.....	5
4. Tudományos eredmények.....	6
4.1. Multiágensű teleoperációs robotrendszerek irányítási modellje.....	6
4.1.1. A NASREM kiterjesztése multiágensű telerobotikai rendszerekre.....	7
4.1.2. A tézis hasznosítása.....	8
4.2. Lábakon járó robotok off-line mozgástervezése.....	9
4.2.1. Kulcspozícióban vezérelhető, lábakon járó robotok.....	9
4.2.2. Mozgástervezés kulcspozíciókban.....	10
4.2.3. A mozgás iteratív javítása a dinamikus modell segítségével.....	10
4.2.4. A fizikai robotok teleoperációja.....	13
4.2.5. A tézis hasznosítása.....	14
4.3. Defókuszáltság alapú mélységbecslés.....	15
4.3.1. A tématerület ismertetése.....	15
4.3.2. Egydimenziós diszkrét Fourier transzformáció alapú mélységbecslési algoritmus.....	16
4.3.3. A tézis hasznosítása.....	18
5. Eredmények hasznosítása.....	18
5.1. EMSER – humanoid teleoperációs platform.....	18
5.2. A MINISTER mikromanipulációs munkacella.....	19
A tézisekben hivatkozott tudományos közlemények.....	21
További saját tudományos közlemények.....	22
Irodalomjegyzék.....	23

## Tézisjegyzék

1. TÉZIS.....	6
2. TÉZIS.....	9
3. TÉZIS.....	15

## 1. Bevezetés

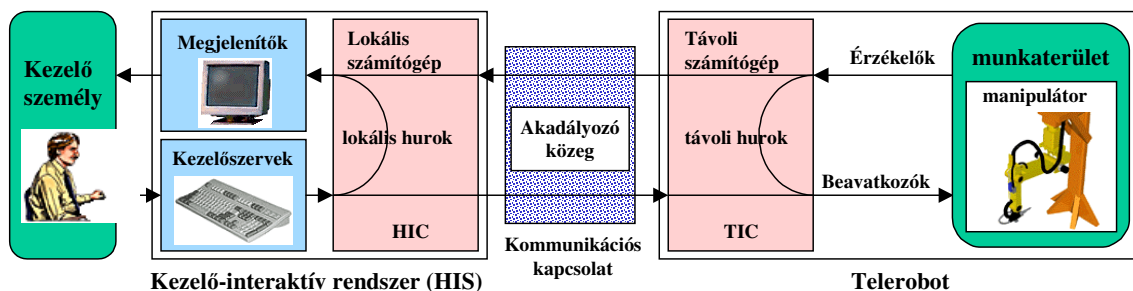
Az évezred végére a tudomány és a technika fejlődésével sorra nyíltak meg a lehetőségek újabb és újabb anyagmozgatási problémák robotizált megoldására. Manapság már nemcsak a jól definiálható és modellezhető ipari környezetben találkozunk robotokkal, hanem megjelentek a mindennapi életünkben, a szórakoztatóiparban és a háztartásban is. S bár a trendek azt mutatják, hogy a beágyazott rendszerek egyre intelligensebbek, a robotokkal foglalkozó kutatók felismerték, hogy változékony, vagy nehezen modellezhető környezetben végzendő feladatokra nem lehetséges teljesen önállóan működő robotokat készíteni.

Ilyen esetekben nyújt segítséget a teleoperáció és a telejelenlét eredményeit ötvöző **telerobotika**, amely rosszul specifikált környezetben végzendő anyagmozgatási feladatok emberi távfelügyelettel történő elvégzésével foglalkozik. Telerobotika teszi lehetővé úrkutatási feladatok, veszélyes környezetben végzendő feladatok, vagy távsebészeti műtétek végrehajtását a mesterséges intelligencia és az emberi intuíció szinergialehetőségeinek kihasználása révén.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszékén a kilencvenes évek eleje óta folyik gépi látással és intelligens robotokkal foglalkozó kutatómunka. A témában számos tudományos cikk [26] [27] [28] és disszertáció [29] [30] is született, amelyek megalapozták, illetve segítették a telerobotikai témájú kutatómunkámat.

### Telerobotikai rendszerek felépítése

A telerobotikai rendszerek alapját az emberi felügyeleti irányítás általános modellje adja, amelyet az alábbi ábra szemléltet:



1. ábra: Telerobotikai rendszerek általános felépítése [32] alapján

A kezelő személy az interaktív kezelőrendszer (Human-Interactive System - HIS) segítségével csatlakozik a felügyelt telerobotikai rendszerhez. Az általa küldött parancsok a telerobothoz egy dedikált kommunikációs kapcsolaton keresztül jutnak el. A telerobot érzékelői által feldolgozott jelek adnak visszajelzést a manipulációs tér eseményeiről, így a kiadott parancs hatásáról is.

A kommunikációs kapcsolat a legtöbb telerobotikai alkalmazásban megnehezíti a közvetlen irányítást. Rendszerint nem elhanyagolható késleltetéssel és csak korlátozott sávzélességgel rendelkezik, gyakran nem megbízható (például IP hálózatok esetén csomagvesztés történhet). A robot irányítását tovább nehezíti az esetlegesen dinamikusan változó holtidő (jitter) is. Ezt a szabályozástechnikai problémát két visszacsatoló hurok beiktatásával oldják meg.

A kezelőrendszer oldali visszacsatolás ergonómiai célú, a kiadott parancs tényét és esetleg várható hatását jelzi vissza a kezelő személy számára – lehetővé téve ezzel a kommunikációs kapcsolat holtideje ellenére a folyamatos irányítást. A telerobot oldali visszacsatolás pedig egy olyan intelligens szabályozóköri feladat, melynek feladata a telerobot mozgatása az érzékelői által feldolgozott információk, illetve a kezelő személytől kapott utasítások alapján.

A telerobotikai rendszereknek alapvető jellemzője ez az úgynevezett intelligens, **félautonóm működés**. Ez teszi lehetővé, hogy a telerobot váratlan eseményekre adekvát

módon reagáljon, például egy hirtelen felbukkanó tárgyat kikerüljön anélkül, hogy a kezelő személy erre külön utasítást adna. Ez kiváltképp olyan helyzetekben fontos, amikor a robot a holtidő kétszeresén belül ütközne, ilyenkor a kezelő személynek elvi lehetősége sincs az ütközés megakadályozására. A telerobot intelligenciája és a környezet változékonyságának függvényében a telerobotot kezelő személy feladata a közvetlen vezérléstől egészen a stratégiai irányításig széles skálán megválasztható.

A fent leírt félautonóm viselkedést megvalósító intelligens szabályzó kör tervezéséhez ad segítséget a NASREM [28] telerobotikai referenciamodell.

### **Multiágensű robotika**

Az **ágens** fogalmára a szakirodalomban különböző definíciókat is találunk. Egy általános definíció szerint az ágens egy olyan autonóm entitás, amely céljai elérésére törekszik, önálló döntések meghozatalára képes, és a környezet változásaira reaktív, esetleg proaktív módon tud reagálni. Egy ágens fontos jellemzője, hogy képes más ágensekkel is kommunikálni.

Multiágensű robotika többségében mobil robotcsoportokkal foglalkozik, amelyek a fenti definíciónak megfelelnek. Önálló döntésre képes, a környezet változásaihoz proaktívan alkalmazkodó robotcsoportot olyan problémák esetén alkalmaznak, amelyeknél koordinált beavatkozásra van szükség egymástól relatív távol eső helyeken.

Az egyes ágensek vezérlésének megvalósítására különböző módszerek vannak. Arkin [33] séma alapú viselkedésorientált megközelítést számos esetben sikerrel alkalmazták. A robot ágensek viselkedési mintákkal rendelkeznek, amelyek mindannyian a robot haladási irányát próbálják befolyásolni. Minden egyes viselkedési séma egy-egy vektort generál az általa megfelelőnek tartott irányba, melyek hossza az illető viselkedés az adott szituációban számított fontosságával arányos. Ezen vektorok eredőjét normalizálva adódik a robot eredő mozgásiránya, amelyet a mozgástervező algoritmus végrehajt. Ez a megközelítést [34] is részletesen tárgyalja.

### **Multiágensű telerobot rendszerek**

Multiágensű telerobotrendszerek (MTR) lehetővé teszik egy vagy több felhasználó számára távoli robotok egy csoportjának felügyeleti irányítását a telerobotika és a multiágensű robotika kedvező tulajdonságainak egyesítésével. Egy ilyen rendszer tervezésénél felmerülő problémák nem kezelhetők kizárólag az egyik, vagy a másik diszciplínában megszokott módon, sőt további kérdések is felmerülnek:

- Hogyan képes a kezelő személy megosztani a figyelmét egy robotcsoport egyidejű irányítása során?
- Hogyan tud együttműködni a kezelő személyek egy csoportja, akik ugyanazokat a robotokat irányítják?
- Hogyan egyesíthető a kezelő személyek parancsai a többi ágensből származó utasításokkal a robot saját döntésével?

A telerobotikai vagy a multiágensű rendszereknél használt tervezési módszerek némi módosítással általánosíthatóak. Például a séma alapú irányítás kétféleképpen is átültethető multiágensű telerobotikai környezetbe

- A felügyelő személy tekinthető egy többi robottal egyenértékű ágensnek, amely közvetlenül próbálja befolyásolni egy vagy több robot haladási irányát.
- A felügyelő személy közvetlenül állítja a viselkedési sémák súlyait, ezáltal a rendszer szempontjából egy ágensek feletti entitásként szerepel.

A multiágensű telerobotika tehát felfogható egy olyan általános diszciplínaként, melynek egyik speciális esete a telerobotika, ha csak egyetlen robotot irányítunk, illetve egy másik a multiágensű robotika, ha nincs felügyelő személy.

## 2. Kitűzött célok

Az értekezés a multiágensű telerobotikai rendszerek intelligens irányításával foglalkozik. Munkámban a következő részfeladatok megoldását tűztem ki célul:

- A multiágensű telerobotrendszerek félautonóm irányításának általános, hierarchikus modellezése. A szakirodalomban számos helyen találkozhatunk azzal a ténnyel, hogy a telerobotok vezérlésére alkalmazott NASREM hierarchikus referenciamodell nem alkalmazható multiágensű rendszerek felügyeleti irányításának tervezésére. Kutatásaim fő célja tehát a komplex irányítási probléma egymásra épülő hierarchiaszintekkel történő modellezése, külön kitérve a multiágensű viselkedést lehetővé tevő rendszerösszetevők modelljének megalkotására. Az egyes vezérlési szintek modellje magában foglalja a manipulációs tér reprezentációjának az adott irányítási hierarchiaszinthez tartozó legfontosabb elemeit, illetve hogy ezek paramétereit miként lehet a rendelkezésre álló szenzorjelekből kinyerni.
- Multiágensű telerobotikai rendszereket vizsgálva gyakran találkozunk lábakon járó robotokkal, amelyek vezérlése mozgásprimitív szinten kulcspozíciók sorozatának megadásával történik. Kutatásaim második célkitűzése az ilyen rendszerekben a kinematikai alapon tervezett elemi mozgások egy olyan optimális halmazának előállítására, melyek felhasználásával a ráépülő hierarchiaszintek a telerobotot a tervezett pályáján tudják tartani.
- A legtöbb telerobotikai rendszerben vizuális szenzorokat alkalmaznak. Kis mélységélességgel rendelkező optikával lehetőség nyílik a tárgyak térbeli helyzetének – kifejezetten a mélységének – elmosódottság alapján történő automatikus becslésére. A megoldandó feladat egy választott telerobot manipulációs terének geometriai modellezése és manipulátorának passzív vizuális alapon történő pozícióbecslése.
- A referenciamodell és az algoritmusok gyakorlati alkalmazhatóságát igazolni kell két egymástól lényegesen eltérő multiágensű telerobotikai rendszer felépítésének és működésének ismertetésével.

## 3. Választott módszerek és eszközök

Az értekezésben bemutatott pozícióbecslési és mozgástervezési algoritmusok közös jellemzője, hogy mindkét optimalizálási problémát egy numerikusan számítható nemlineáris költségfüggvény minimumhelyének keresésére vezetik vissza. A költségfüggvények deriváltja numerikus úton határozható meg, az optimum így gradiens alapú iteratív eljárásokkal közelíthető. A kísérleti fázisban ezt a MATLAB Optimization Toolboxa segítségével végeztem.

A kísérleti humanoid robot mozgásának off-line optimalizációjához szükséges volt a robot dinamikuss viselkedésének modellezése, amely az erre a célra szabványosított Modelica nyelven [46] készült, a szimuláció pedig Dymola [45] környezetben történt. A pozícióvisszacsatolási algoritmus a megvalósított humanoid teleoperációs rendszer többi szoftver komponenséhez hasonlóan Microsoft .NET 2.0 környezetben C# nyelven került implementálásra.

A pozícióbecsléshez szükséges vizuális adatok feldolgozására a MATLAB Image Processing Toolbox, a mérések kiértékeléséhez és a hibaelemzéshez pedig a Statistics Toolbox szolgáltatásait használtam fel.

## 4. Tudományos eredmények

A dolgozatban kifejtett tudományos eredményeim a kitűzött célok szerint három szakaszra bonthatók, melyeket a következő alfejezetekben foglalom össze.

### 4.1. Multiágensű teleoperációs robotrendszerek irányítási modellje

Kutatásaim első fázisában a telerobotika és a multiágensű robotika a határterületével foglalkoztam.

#### 1. Tézis [5] [6] – a dolgozat 2. Szakasza

Általánosítottam a telerobotikai rendszerek felügyeleti irányításának tervezésére alkalmazott NASREM referenciamodellt, kiegészítve olyan új komponensekkel, amelyek lehetővé teszik a modell alkalmazását multiágensű telerobotrendszerek intelligens vezérlésének tervezésére is.

#### A NASREM telerobotikai referenciamodell

A NASREM rövidítés jelentése „NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture” [31], azaz a telerobotok vezérlési architektúrájának NASA által ajánlott szabványos referenciamodellje. Funkcióját tekintve hasonló a nyílt rendszerek közötti kommunikációt szabványosító ISO/OSI referenciamodellhez. Mindkét modell egy komplex problémakör feladatait rendszerezi, s azok természetes egymásra épülése alapján strukturálja. Minden egyes szint a hozzárendelt probléma megoldásával elfedi annak komplexitását és egy absztrakt szolgáltatást nyújt a felette lévő szintek számára.

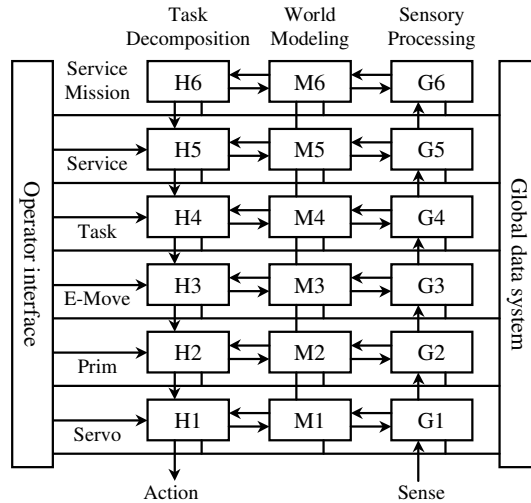
A NASREM a telerobotok félautonóm viselkedését megvalósító intelligens szabályzó kör tervezéséhez ad segítséget oly módon, hogy a vezérlési problémát hat szintre osztja:

1. A **szervo szint** feladata a robot csuklóinak megadott függvény szerint történő mozgatása. A robot dinamikai modellje és a külső erők zavaró hatásainak identifikálásával az irányítási feladat a szervókra jutó beavatkozási jel segítségével a pozíció alapjel minél pontosabb lekövetése.
2. A **mozgásprimitív szint** feladata néhány csukló, például egy láb vagy a robot kerekeinek koordinált irányítása kibővített dinamikus modell alapján.
3. Az **elemi mozgások szintjén** a feladat a robot mozgásának összetett irányítása.
4. A **feladat szinten** a robot egy konkrét cél érdekében végzett mozgásainak összehangolását és végrehajtását értjük.
5. A **szolgáltatás szint** az egy helyszínen végezhető feladatok összességének koordinálásával foglalkozik. A fő probléma a közösen használt erőforrások – úgymint hely, eszközök – elosztásának megszervezése.
6. A **küldetés szint** a különböző helyszíneken elvégezhető feladatok összességének kivitelezését koordinálja.

Minden egyes szint a robot irányításának egy-egy aspektusával foglalkozik, felépítésüket tekintve három modulból állnak.

- szenzorok jeleinek feldolgozása
- a manipulációs környezet modellezése a hierarchiai szint feladatának megfelelően
- az irányítási feladat dekompozícióját végrehajtó mozgástervező modul

A szintek és moduljainak felépítését az alábbi ábra szemlélteti.



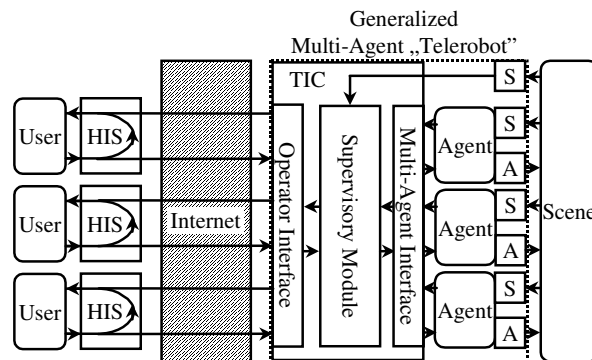
2. ábra: A NASREM referenciamodell felépítése [31]

#### 4.1.1. A NASREM kiterjesztése multiágensű telerobotikai rendszerekre

Kutatásaim a fentiekben bevezetett tématerületre irányult. Azt vizsgáltam, hogy teljesen önálló működésű multiágensű robotcsoportot hogyan lehet távoli felügyeleti irányítással ellátni, azaz a telerobotikában alkalmazott modelleket és módszereket hogyan lehet egy többgyedes, önálló döntéseket hozó robotcsoport emberi irányítására alkalmazni.

Bár a témában születtek értékes publikációk, például K.S. Ali disszertációja [34] jól tükrözi a korszerű elméleteket, felismertem, hogy multiágensű telerobotrendszereknél a félautonóm viselkedés megvalósítására nincs egységesen elfogadott referenciamodell, tehát érdemes a kérdést tudományos igényességgel megvizsgálni.

Első lépésben megalkottam az ember által felügyelt multiágensű telerobotrendszerek általános modelljét, amely az 1. ábra általánosításának tekinthető.



3. ábra: A multiágensű többfelhasználós felügyeleti irányítás általánosított modellje [5]

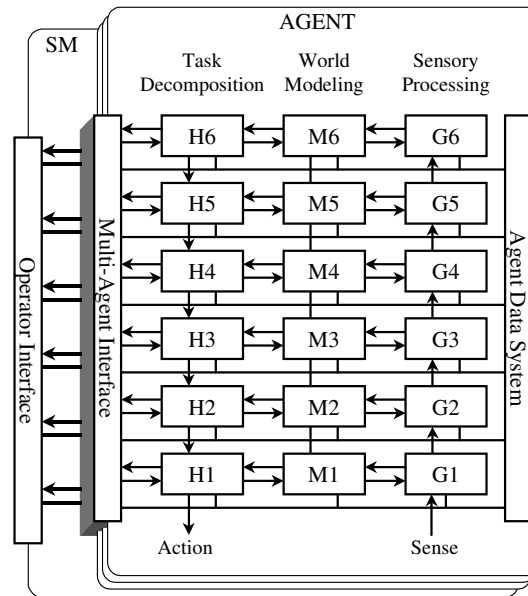
A robotrendszer több ágensből áll, mindegyik rendelkezhet saját szenzorokkal és aktuátorokkal, a robotokat akár több felügyelő személy is irányíthatja. Egy hagyományos telerobotikai rendszerrel szemben új rendszerkomponenseket vezettem be.

A robot ágensek közötti kommunikáció a **multiágens interfészen** keresztül zajlik. Ez reprezentálja a robotok egymás közti elosztott kommunikációt és a központi rendszerrel folytatott üzenetváltást is. A multiágens interfészen az ágensek információit cserélhetnek a környezetükről, adhatnak egymásnak parancsokat, vagy egyszerűen státuszinformációkat közölhetnek a környezetükkel. A kommunikáció lehet akár pont-pont, akár üzenetszóró jellegű is. Az interfész tehát erősen függ a konkrét megvalósítástól, a kommunikációs protokollja által definiált.

A felügyelő személy(ek) parancsait az ún. **felügyelő modul** fogadja és dolgozza fel, amelyhez akár egy robotoktól független, központi szenzorrendszer is csatlakozhat. Az általánosított telerobot a felügyelő személyekkel az **operátor interfészen** keresztül tart kapcsolatot. Az operátor interfész szintén a kommunikációs protokolljával definiálható.

A szakirodalom szerint a felügyelő személy szerepe kétféle lehet. Megjelenhet a rendszer számára egy önálló ágensként, ekkor a felügyelő modul a robotokéval azonos, vagy nagyon hasonló protokollon keresztül kommunikál, vagy megjelenhet az ágensek felett álló koordinátorként, ekkor a felügyelő modultól teljesen más jellegű parancsok is érkehetnek.

A modell legfontosabb eleme a rendszer egyes ágenseinek intelligens vezérlése. Kutatásaim során azt vizsgáltam, hogy a NASREM architektúra hogyan általánosítható multiágensű telerobotrendszerekre. Az általam javasolt architektúrát az alábbi ábra szemlélteti.



4. ábra: A NASREM általánosítása multiágensű többfelhasználós esetre

A robotrendszer összetétele alapján lehet homogén, vagy heterogén is, ami azt jelenti, hogy a robotok fizikailag és vezérlési algoritmusuk tekintetében is teljesen más felépítéssel rendelkezhetnek. Minden egyes robot ágens, tehát a mozgásáról saját, önálló döntést hoz, így a vezérlési architektúra ágensenkénti partícionálása indokolt. Az egyes robotok irányítása így nagyon hasonló egy felügyeleti irányítással ellátott telerobotéhoz, a lényeges különbség, hogy a robot viselkedését nem csupán egyetlen felügyelő személy befolyásolja, hanem több személy és több robot együttesen. A NASREM által ajánlott operátor interfész helyébe az előbb bevezetett multiágens interfész lép.

Ez indokolja a **feladat dekompozíciós modulok** szerepének módosítását is. Minden egyes szinten a multiágens interfész megfelelő részét implementálnia kell. Az interfészen keresztüli kommunikáció kétirányú, hiszen egy ágens más ágensek számára adhat jelzéseket, parancsokat. A multiágensű viselkedést megvalósító sémákat tehát szét kell bontani a hierarchia megfelelő szintjeire, ahol minden egyes szinthez tartozó döntést az azonos szinten található világmodell alapján lehet meghozni.

#### 4.1.2. A tézis hasznosítása

A tézis gyakorlati alkalmazhatóságát két multiágensű telerobotikai rendszer igazolja, melynek architektúrája a fenti modell alapján készült. A rendszerek felépítését és működését a tézisfüzet 5. fejezete, valamint az értekezés 3.8, illetve 4.6 szakaszai mutatják be.



## 4.2. Lábakon járó robotok off-line mozgástervezése

Telerobotok irányítása során elsődleges szempont, hogy az operátor szándékait a robot minimális hibával kövesse. Multiágensű környezetben továbbá előírás, hogy a robot ágensek intelligensen korrigálni tudják saját pozícióhibáikat, ezáltal a rendszer konzisztens állapotban tartható és az ágensek egymás közt kooperációra képesek. Ehhez a mozgástervezés numerikus optimalizációjára van szükség.

Lábakon járó robotok mozgástervezéséről sok éve folynak kutatások, melyek eredményei a közelmúltban számos kereskedelmi termékbe integrálódtak, mint például a Sony AIBO robotkutyája [43], vagy a Honda ASIMO [44] humanoid robotja. Párhuzamosan kezdtek megjelenni olyan szerkezetek, melyek belső felépítése gyökeresen más algoritmust igényel erre a feladatra. A robotok e családja esetében a mozgás folyamata csak diszkrét időpillanatokban befolyásolható, miközben a beépített pályatervező alrendszer önállóan csupán (lineáris) interpolációt végez ezekben az ún. kulcspozíciókban megadott konfigurációk között. Így működnek például a Kondo cég KHR sorozatú robotjai is [42].

A dolgozat 3. szakaszának alapvető célkitűzése a robotok e családjához szükséges mozgástervezési eljárás numerikus, offline optimalizálása volt. A virtuális valóságban alkalmazható új eljárás alapján az ideális mozgás kulcspozícióiban a csuklókoordináták hangolása és az egyes kulcspozíciók megfelelő időbeli ütemezése előzetesen csökkenti a különbséget az elvárt (kinematikai modell szerinti) és a szimuláció során megvalósuló (dinamikus) mozgás között.

A fizikai robotok teleoperációs irányítására előre generált, az új algoritmus segítségével optimalizált mozgások gyűjteménye áll rendelkezésre: az egyes diszkrét esetekben bizonyos mozgásparaméterek (pl.: lépéshossz, elfordulási szög) különböznek. A fizikai robotok tényleges mozgása során fellépő hibák korrekciója pedig szenzorok és pozíció-visszacsatolás alapján, adaptív módon történik: a soron következő mozgás kiválasztását az adott roboton mért aktuális pozíció-hiba befolyásolja.

### 2. Tézis [9] [11] [12] [13] – a dolgozat 3. Szakasza

- a) Kulcspozíciók sorozatával vezérelhető, lábakon járó telerobotok kinematikai modell alapú mozgástervezésére egy új, numerikus optimalizációra épülő eljárást alkottam, mely által a mozgás dinamikus modell szerinti végrehajtása során fellépő hatások előre kompenzálhatók a virtuális valóságban.
- b) A fenti eredményt felhasználva egy konkrét architektúrát javasoltam a kulcspozíciók sorozatával vezérelhető, lábakon járó robotokból álló multiágensű robotrendszer felügyeleti vezérlésére, és megalkottam egy új algoritmust, amely által egy fizikai telerobot mozgásnak a dinamikus modell pontatlanságaiból eredő hibái az a) pont alapján generálható javító mozgások segítségével korrigálhatók.

### 4.2.1. Kulcspozícióban vezérelhető, lábakon járó robotok

A szükséges kulcspozíciók létrehozására számos interaktív eszköz és eljárás ismert, mellyel a kinematikai kényszerek alapján egy ideális mozgás előállítható. Az ideális kinematikai modell elhanyagolja a newtoni fizika szerinti dinamikus hatásokat, így a robot közvetlen irányítására nem alkalmas. A dinamikus modellt folytonos időben használó online pályatervező algoritmusok például Sardain és Bessonnet által bevezetett virtuális erők [35] vagy a ZMP [36] képesek e hatásokat korrigálni, viszont ezek az eljárások nem alkalmazhatók a problémafelvetésben bemutatott, csak diszkrét pillanatokban vezérelhető robotok családjában.

A kulcspozíciókban vezérlehető robotok teleoperációja a bemutatott okoknál fogva egy komplex mozgástervezési folyamatot igényel. Az egyes robotoknak félautonóm módon – az operátor szándéka és a szenzoros visszacsatolás alapján – kell a megfelelő korrekciós mozgást kiválasztaniuk, mely a következő lépésben végrehajtásra kerül.

#### 4.2.2. Mozgástervezés kulcspozíciókban

A feladat egy ideális járás mozgás létrehozása egy fizikai, diszkrét időben vezérlehető teleroboton. A robot adott szegmense térbeli helyzetének előírása során a szükséges csuklókoordináták kiszámítása a kinematikai modell matematikai invertálásával történik.

A dolgozatban ismertetésre kerülő, inverz kinematika (IK)-alapú technika segítségével egy animátor képes a kívánt mozgás kulcsfázisainak megtervezésére. A folyamat során az alábbi kinematikai modellt és a csuklótérben lineáris interpolációt használva áll elő a folyamatos referencia-mozgás.

##### Kinematikai modell

Feltételezhetjük, hogy a robot  $J$  darab sorszámozható csuklóval rendelkezik ( $1 \leq j \leq J$ ), valamint a szerkezet  $(J+1)$  darab szegmensből áll, ahol  $0 \leq j \leq J$ . A referencia-mozgást  $K$  darab kulcsfázis definiálja, az egyes fázisok időtartama  $\tau_k$ , a csuklók értékei pedig rendre  $q_{k,j}$  ( $\rightarrow \Theta^{[K \times J]}$  változó-mátrix).

A robot hierarchikus felépítése révén létezik egy 0. (bázis) szegmens, melynek kezdeti helyzetét a (globális) Descartes-térben a 6 dimenziós  ${}^0\Gamma_0$  vektor írja le. A többi szegmens mindenkor bázis-relatív térbeli helyzete a csuklók értékeit használva kiszámítható. Ezen felül az ideális járás előírása, hogy minden egyes fázisában kell, hogy legyen a talajon egy szegmens (a lábakon járó robot esetén a támasztó láb lábfeje), melynek globális térbeli helyzete az adott fázis ideje alatt állandó. A  $k$ . fázisban rögzített szegmens indexe  $u_k$  ( $\rightarrow \mathbf{u}$  paraméter vektor).

A kulcsfázisok közti interpolációs technika ismeretében a  $j$ . szegmens globális térbeli helyzetének idő-függvénye:

$${}^j\Gamma^{Kin}(t) \equiv {}^j\Psi^{Kin}\{\Theta, \mathbf{u}, \tau, {}^0\Gamma_0\}(t), \quad 0 < j \leq J \quad (1)$$

Ez a vektor-értékű függvény 6 dimenziós (3 pozíció + 3 orientáció szabadságfokkal), így az összes szegmensre egy  $6 \cdot (J+1)$  dimenziós vektor-függvény alkotható:

$$\Gamma^{Kin}(t) \equiv \Psi^{Kin}\{\Theta, \mathbf{u}, \tau, {}^0\Gamma_0\}(t) \quad (2)$$

Ezzel a robot  $\Psi^{Kin}$  kinematikai modellje bevezetésre került.

#### 4.2.3. A mozgás iteratív javítása a dinamikus modell segítségével

Az előző alfejezetben elhanyagolt dinamikus hatások (tehetetlenség, lendület, perdület) következtében a már rendelkezésre álló (ideális) referencia-mozgás egy fizikai roboton végrehajtva eltérő viselkedést eredményez. Jóllehet, ha az összes csukló ténylegesen követni tudná az előírt alapjelet, valamint a képzeletben rögzített szegmens helyzete az egyes fázisok alatt valóban nem változna, akkor a fizikai robot mozgása megegyezne az ideálissal.

##### Dinamikus szimuláció

Az előírt és a ténylegesen megvalósuló mozgás közti hasonlóság megteremtése érdekében szükség van a dinamikus modellezésre, mely a korábban említett dinamikus hatásokat magában hordozva valósághű eredményeket szolgáltat. A modell megalkotásának folyamata

[37] eredményei alapján történt. A kapott modell alapján egy virtuális robot dinamikus viselkedése szimulációs úton tanulmányozható.

A tézisben megfogalmazott numerikus optimalizáló eljárás iteratív természetű, a felhasznált dinamikus modell bemeneti paraméterei az  $i$ . iterációban a kinematikai modellnél bevezetett jelölésekkel:

$$\Gamma_{(i)}^{Dyn}(t) \equiv \Psi^{Dyn} \{ \Theta_{(i)}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\tau}_{(i)}, {}^0\Gamma_0 \}(t) \quad (3)$$

Az egyes iterációk során a  $\Theta$  csuklóérték-mátrix és a  $\boldsymbol{\tau}$  kulcspozíció-vektor kerül változtatásra, a modell többi paramétere állandó marad.

### Iteratív javító algoritmus

Egy adott iteráció futási eredményét tekintve a dinamikus modell kimenete és a referencia-mozgás közt az alábbi vektor-függvény adja az eltérést:

$$\Gamma_{(i)}(t) = \Gamma_{(i)}^{Dyn}(t) - \Gamma^{Kin}(t) \quad (4)$$

Számos esetben a pozícióhiba hangsúlyosabb, mint az orientációban történő eltérés, valamint ez az egyes szegmensek esetében más-más fontossággal bír az egyezés az ideálisan előírtakkal. Erre a célra egy  $[(J+1)*6 \times (J+1)*6]$  dimenziós  $\mathbf{W}$  diagonálmátrix definiálható, mely ezt a súlyozást tartalmazza:

$$\mathbf{W} = \text{diag} \langle w_0, w_1, \dots, w_J \rangle \quad (5)$$

(4) és (5) alapján a súlyozott, négyzetes hibafüggvény egy belső szorzattal definiálható:

$$E_{(i)}^2(t) = \langle \mathbf{W} \cdot \Gamma_{(i)}, \mathbf{W} \cdot \Gamma_{(i)} \rangle \quad (6)$$

A (6) négyzetes hibafüggvény alapján definiálható egy nem negatív, skalár értékű norma, mely a dinamikus szimuláció és a kinematikai modell alapján viselkedő ideális robot mozgásának egyezését méri. Egy  $T$  ideig tartó mozgás során az  $i$ . iterációban a norma értéke:

$$\chi_{(i)} \{ \Theta_{(i)}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\tau}_{(i)}, {}^0\Gamma_0 \} = \int_0^T E_{(i)}^2(t) \cdot dt \quad (7)$$

A (7) egyenletben definiált  $\chi$  mennyiség egy norma a  $\Gamma(t)$  függvény vektorteréből alkotott Hilbert-térben. E norma minimumra csökkentése egyenértékű a kitűzött feladattal, és a megvalósításhoz a  $\Theta_{(i)}$  és  $\boldsymbol{\tau}_{(i)}$  változók paramétereit kell iterációról-iterációra változtatni, miközben további kényszerekre (csukló mozgáshatárok, mozgás teljes időtartama) szintén ügyelni kell. A  $\chi_i$  értékek monoton csökkenő sorozatára van szükség a mozgás optimális kulcshelyzeteinek meghatározásához:

$$(\Theta_{opt}, \boldsymbol{\tau}_{opt}) = \arg \min_{(\Theta, \boldsymbol{\tau})} \chi \{ \Theta, \mathbf{u}, \boldsymbol{\tau}, {}^0\Gamma_0 \} \quad (8)$$

Az alábbiakban ismertetett új numerikus eljárás oldja meg a feladatot.

### Új numerikus optimalizáló eljárás

Az optimalizálási feladat független bemeneti változóinak ( $\mathbf{x}_i := (\Theta_i, \boldsymbol{\tau}_i)$ ) értelmezési tartományában létezik egy összefüggő  $\mathbf{D}$  részhalmaz, mely az alábbi tulajdonságokkal bír:

- azokat a független változó értékeket tartalmazza, melyek a megadott szélsőértékeiken belül vannak, és amelyekben a robot járása dinamikusan stabil
- a 0. iteráció független változói megegyeznek a referencia mozgás kulcsértékeivel és kulcspozícióival:  $\mathbf{x}_0 := (\Theta_{Kin}, \boldsymbol{\tau}_{Kin})$

Továbbá a következő feltételezések fent kell, hogy álljanak az optimalizáció során:

- $\chi(\mathbf{x})$  folytonos, és differenciálható  $\mathbf{D}$  fölött

- a  $\mathbf{D}$  tartomány határa mentén a negatív gradiens  $(-\nabla\chi)$  a tartomány belseje felé mutat
- az optimum  $\mathbf{x}_{opt} = (\boldsymbol{\Theta}_{opt}, \boldsymbol{\tau}_{opt})$  változó értékek  $\mathbf{D}$  egy belső pontját képezik, és
- $\mathbf{D}$ -ben nincs más lokális szélsőértéke  $\chi(\mathbf{x})$ -nek.

Ameddig a robot járása stabil, a bemeneti változók infinitezimális változása a norma infinitezimális változását vonja maga után. A járás instabillá válása, illetve a robot nemkívánatos elesése a  $\chi$  norma-függvényben szakadási pontként jelenik meg. A  $\mathbf{D}$  tartomány határai mentén oszcillációk lépnek fel, és a dinamikus modell által eredményezett mozgás erősen kezd eltérni a referencia-mozgástól, növelve a norma értékét. Emiatt a negatív gradiens a határpontokban befelé kell, hogy mutasson.

Az IK alapú kinematikai mozgástervezés eredménye stabil, így a definíció szerint  $\mathbf{D}$ -beli változóértékek tartoznak  $\mathbf{x}_0$ -hoz. Mivel a felhasznált robot mozgása nem képes tökéletesen követni egy ideális alapjelet, a bevezetett  $\chi$  norma minimum értéke nagyobb, mint zérus. A minimumhelyen viszont a  $\nabla\chi$  gradiens-vektor  $\mathbf{0}$  kell, hogy legyen.

A  $\chi(\mathbf{x})$  norma-függvény erősen nemlineáris tulajdonsága miatt egy iteratív, konjugált gradiensre alapuló eljárás [38] felhasználása vezet célra. A gradiens vektort a norma-függvény parciális differenciáhányadosaival közelítjük. A gradiens vektor  $i$ . komponense:

$$\nabla\chi(\mathbf{x})_i = \left[ \frac{\chi(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}_i) - \chi(\mathbf{x})}{|\Delta\mathbf{x}_i|} \right], \quad (9)$$

$$\Delta\mathbf{x}_i = \pm\epsilon * \mathbf{e}_i$$

ahol  $\mathbf{e}_i$  a bemeneti változók vektorterének  $i$ . bázis-vektora. Az  $\epsilon$  infinitezimális skálár előjele úgy választandó, hogy az  $\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}_i$  vektor  $\mathbf{D}$  belső pontja legyen. Ha a szélsőérték-korlátozások sérülnének, a másik előjelet kell használni. Ha egyik esetben sincs ilyen belső pont, akkor a gradiens vektor  $i$ . komponense 0-nak veendő. A gradiens vektor kiszámításához  $(J^*K+K+1)$  teljes dinamikus szimuláció futtatására van szükség.

Az új algoritmus kezdetén a negatív gradiens irányában módosítandók a bemeneti paraméterek. Egy 1-dimenziós vonal mentén keresendő az  $\mathbf{x}_1$  minimumhely. A továbbiakban az iteratív eljárás  $n$ . lépése az alábbi 5 fő pontban foglalható össze:

1. A  $\nabla\chi$  gradiens kiszámítása az aktuális  $\mathbf{x}_n$  pontban (9) szerint.
2. A  $\beta_n$  faktor kiszámítása a Polak–Ribière képlet alapján történt:

$$\beta_n = \max \left[ \frac{\nabla\chi(\mathbf{x}_n)^T * (\nabla\chi(\mathbf{x}_n) - \nabla\chi(\mathbf{x}_{n-1}))}{\nabla\chi(\mathbf{x}_{n-1})^T \nabla\chi(\mathbf{x}_{n-1})}, 0 \right] \quad (10)$$

3. A konjugált irány kiszámítása:

$$\Lambda\mathbf{x}_n = \nabla\chi(\mathbf{x}_n) + \beta_n \Lambda\mathbf{x}_{n-1} \quad (11)$$

4. Egy dimenziós keresés a (11)-ban kapott irányban:

$$\min_{\alpha_n} \chi(\mathbf{x}_n + \alpha_n * \Lambda\mathbf{x}_n) \quad (12)$$

5. A következő pontra ugrás, majd 1.-ben új iterációval folytatás:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \alpha_n \Lambda\mathbf{x}_n \quad (13)$$

A nemlineáris (és nem négyzetes) költségfüggvényre alkalmazott konjugált gradiens módszer tulajdonsága, hogy időnként érdemes „újraindítani”, azaz ismételten a negatív gradiens irányában elindulni. Erre akkor kell sort keríteni, ha a (13) egyenletben definiált együttható pozitívvá válik, valamint bizonyos – mechanika által meghatározott – lépésközönként. Az algoritmus leáll, ha az 1. pontban a gradiens vektor magnitúdója egy határérték alá süllyed.

## Megjegyzések

Az algoritmus által eredményezett, optimalizált mozgás stabilitási tartaléka nem garantálható explicit módon, mivel az erősen függ a kinematikai alapon megtervezett referenciamozgás stabilitási tulajdonságától. A fent közölt eljárás csak abban az esetben alkalmazható, ha a referenciamozgás a dinamikus modellen és így a fizikai roboton végrehajtva eredendően stabil.

Az eljárás ugyancsak nem alkalmazható, ha a kinematikai alapokon tervezett mozgást egyéb dinamikus hatások lényegesen befolyásolják, például a robot nem képes a megadott mozgást csúszás nélkül végrehajtani.

Általánosságban kijelenthető, hogy az eljárás akkor és csak akkor alkalmazható, ha az optimális mozgás létezik, és a referenciamozgás az optimum között az  $\mathbf{x}$  paramétertér  $D$  értelmezési tartományában létezik egy olyan folytonos görbe, melynek mentén a  $\chi$  norma szigorúan monoton csökken.

### 4.2.4. A fizikai robotok teleoperációja

A 2. tézis b) pontja egy olyan algoritmust ír le, amely segítségével a 0. fejezet bevezetőjében definiált robotok egy multiágensű telerobotrendszerbe integrálhatóak a [9] szabadalomban körülírt módon. Az algoritmus a teleoperációs rendszerrel szemben támasztott követelményeit a következő fejezet foglalja össze.

### Multiágensű telerobotikai rendszer off-line tanítható, kulcspozíciók sorozatával vezérelhető, lábakon járó robotok számára

A rendszer kulcspozíciókkal vezérelhetőségéből következik, hogy a robot vezérlése a **szervo szintet** teljes mértékben elfedi. A szervók dinamikáját azonban ismernünk kell, hogy a rendszer dinamikus modelljét fel tudjuk építeni.

A robot egy állapotát reprezentálják a szervók csuklóparaméterei (ide értendő az aktuátorok állapota is). A robot egy **mozgásprimitívje** jellemezhető a robot jelenlegi és célállapotával, valamint az állapotátmenethez szükséges idővel, azaz minden egyes állapotátmenethez rendelhető egy  $\mathbf{x} := (\Theta, \tau)$  vektor, amelyet az új állapot csuklókoordinátáit, és az állapotátmenet idejét foglalja magában. A mozgásprimitív szint a felsőbb szintek számára tehát nem más, mint a robot állapotgráfja, melynek élei egy-egy mozgásprimitívet jelentenek, melynek csuklóműveletre történő lebontása és végrehajtása a vezérlési szint feladata.

Az **elemi mozgások** egymás után aktiválódó mozgásprimitívekből állnak, amelyek nem szakadhatnak félbe. Ez lehet egy lépés, vagy összetett futó/ügető mozgás. Egy elemi mozgás akár 5 - 20 mozgásprimitívet is tartalmazhat, melyek hatását a robot fizikai egysége által végrehajtva az előző fejezet eredményei alapján a (3) egyenletben definiált dinamikus modell helyett a (2) kinematikai modellel szimulálhatunk. A mozgások off-line kerülnek tanításra. Az **elemi mozgás szint** feladata az adott elemi mozgás végrehajtásának koordinálása.

A **feladat szint** felelőssége eldönteni, hogy a robot mikor melyik elemi mozgást hajtja végre. Feladatok jellemezhetők a robot több egymást követő elemi mozgásával, melyek szimulációja úgyszintén a robot kinematikai modellje segítségével történhet.

A kezelő személy mind elemi mozgás szinten, mind pedig feladat szinten beavatkozhat a telerobot működésébe. Elemi szinten beavatkozva egy új  $\mathbf{x}$  vektort küldhet a robotnak, amely az adott elemi mozgás szint működését megváltoztatja, tehát a robot az állapotgráf egy másik irányában fog elindulni. Feladat szinten beavatkozva a robotot egy elemi mozgás végrehajtására utasíthatja.

A robot a manipulációs tér többi ágensét figyelve mindkét vezérlési szinten eldöntheti, hogyan reagál a kezelő személy, és a többi ágens viselkedésére, kommunikációja, vagy parancsaira, azaz melyik mozgásprimitívet, vagy akár elemi mozgást válassza. Ilyen döntést hozhat például egy ütközés elkerülése érdekében.

## Pozícióhiba

A megoldandó probléma a következő: egy elemi mozgás mint ideális referenciamozgás végrehajtása során a fizikai robot végső helyzete (pozíciója és orientációja) eltér a kinematikai szimuláció eredményétől:

$$\Gamma(t) = \Gamma^{Phys}(t) - \Gamma^{Kin}(t) \quad (14)$$

Az eltérésnek két oka lehet:

- a (3) dinamikus modellben alkalmazott egyszerűsítések (pl. súrlódás, kotyogás), numerikus hibák, vagy kalibrációs pontatlanságok miatt a dinamikus szimuláció nem követi le a fizikai robot mozgását,
- az (3) egyenlet szerinti dinamikus modell ciklikus szimulációja során a (6) egyenlet alapján definiált hibafüggvény az elemi mozgás végére nem csökken egy adott hibahatár alá, azaz a dinamikus szimuláció eltér az ideális referencia-mozgástól is.

A hiba a lépések során nyilvánvalóan halmozódik, ezért azt az ágensnek szenzorcsatolással kell korrigálnia. Korrekcióra mindig a következő helyváltoztató mozgás során van lehetőség. A probléma megoldása a **feladat szintre** tartozik, mivel azt kell eldönteni, hogy az ideális referenciamozgás helyett az ágens az érzékelt pozícióhibája miatt melyik másik, rendelkezésre álló elemi mozgását hajtsa végre, amellyel a jelenlegi hibáját csökkentheti.

A megoldáshoz szükség van előre generált korrekciós mozgások ismeretére, melyek az ideális mozgásprogramokból offline módon, a kinematikai paraméterek (pl.: lépéshossz, relatív elfordulási szög) megfelelően granulált változtatásával generálандók. Az így generált mozgásokat a 2. tézis a) pontja szerint optimalizálni kell, hogy kinematikai szimulációjuk közel megegyezzen a valós működéssel.

## Szenzorcsatolás

A pozíció és orientáció hiba kiszámításához az ágensnek ismernie kell a manipulációs tér kinematikai modelljét, ez alapján követni tudja az operátor parancsainak elvárt végrehajtását, és tudja számítani saját elvárt pozícióját. Másfelől a szenzorrendszerének meg kell tudni állapítani a robot aktuális pozícióját.

Rendszertechnikailag két lehetőség van. Vagy az ágens saját maga végzi a korrekciót, vagy pedig a felügyelő rendszer felé kommunikálja a saját helyzetét, és a végrehajtható elemi mozgásokat.

Akármelyik rendszerkomponens feladat szintű vezérlőmodulja végzi a korrekciót, az alternatív mozgások közül azt kell kiválasztania, amelynek végrehajtása következtében az elemi mozgás utáni időpontban várható hibanormát minimalizálja.

Amennyiben a korrekciót végző modul a robot várható végpozícióját kizárólag kinematikai modell alapján becsüli, úgy statikusan egy elemi mozgásból származó folyamatos hibára lehet számítani. Amennyiben az algoritmus a szenzorrendszer segítségével a mozgások tényleges végrehajtását identifikálni képes, úgy a hiba stacionárius része eltűnik.

### 4.2.5. A tézis hasznosítása

A 2. tézisben megfogalmazott, és a fent kifejtett két algoritmus a tézisfüzet 5.1 szakaszában bemutatott multiágensű humanoid teleoperációs rendszerben került hasznosításra, melynek részleteit az értekezés 3.8 pontja mutatja be.

### 4.3. Defókuszáltság alapú mélységbecslés

Multiágensű telerobotikai rendszerek esetében a robotok intelligens autonóm, illetve félautonóm működéséhez elengedhetetlen, hogy a robot a saját és környezete állapotát felderítse. Távfelügyelettel rendelkező rendszereknél ezt az állapotinformációt nemcsak a telerobot, hanem a kezelő személy számára is biztosítani kell, ezért ergonómiai szempontból gyakran alkalmaznak erre a feladatra kamerákat.

A robot számára a kamera képe adatforrás, amelyből a szükséges állapotinformációkat ki kell nyerni, a telerobotikában ezért igen gyakori a képfeldolgozó algoritmusok alkalmazása. Multiágensű telerobotikai rendszereknél az ilyen algoritmusok a módosított NASREM modell G jelű komponenseiben találhatók.

#### 3. Tézis [7] [8] – a dolgozat 4. Szakasza

**Egydimenziós, diszkrét Fourier-transzformáción alapuló új algoritmust dolgoztam ki hosszú, keskeny, sík tárgyak térbeli helyzetének defókuszáltság alapú becslésére, amely egyetlen kameraképet és a tárgy korábban felvett éles képét használja fel. Az algoritmus beilleszthető egy multiágensű telerobotikai rendszer módosított NASREM alapú vezérlési architektúrájának szenzorfeldolgozást végző komponenseibe.**

#### 4.3.1. A tématerület ismertetése

##### Defókuszáltság alapú mélységbecslés

Képfeldolgozó rendszerek tervezői gyakran találkoznak azzal a problémával, hogy háromdimenziós pozícióinformációt kell kinyerni egy kétdimenziós kameraképből. Robotok szenzorcsatolása gyakran vezet erre a pozícióbecslési feladatra – kiváltképp a telerobotikai rendszereknél, ahol mind a pozíciómérés mind pedig a vizuális visszacsatolás elkerülhetetlen. Az esetek döntő többségében a legnagyobb problémát a tárgy kamerától mért távolsága, azaz a mélységkoordináta automatikus meghatározása jelenti.

Vannak olyan gépi látórendszerek, amelyeknél a kamerán, vagy kamerákon kívül további távolságmérésre alkalmas szenzorok is rendelkezésre állnak, az így megvalósított szenzorfüzió pontosabb eredményt szolgáltat. Ezeknél is hasznos többletinformációt nyújt a kamerakép alapú távolságbecslés, de különösképpen azoknál a rendszereknél van nagy jelentősége, amelyeknél csak maga a kamerakép áll rendelkezésre.

A vizuális mélységbecslés történhet aktív, vagy passzív módon. Az aktív mélységbecslést végző rendszerek az optika fókuszsíkjának változtatásával keresik meg a tárgy éles képét, ekkor az optika pozíciójából számolják a tárgy távolságát.

A passzív rendszerek úgynevezett depth-from-defocus (DFD) algoritmusai a tárgy elmosódottságából következtetnek annak fókuszsíktól való távolságára. A módszer alapvető hiányossága, hogy nem lehet eldönteni, hogy a tárgy a fókusz sík előtt, vagy mögött található-e.

A jelenleg használatos algoritmusok két szimultán felvett kameraképből dolgoznak, ehhez egy olyan speciális, drága optikai képrögzítő rendszerre van szükség, amely képes ugyanabból a perspektívából ugyanabban az időpontban két különböző síkra fókuszált képet készíteni.

A DFD algoritmusok alapjait Pentelend dolgozta ki 1987-ben megjelent cikkében [39], melyben közvetlen összefüggést vezetett le az elmosódás mértéke és a tárgytávolság között. Az elmosódást a tárgy éles képe és egy Gauss elmosódási függvény lineáris konvolúciójával modellezte. Elmélete szerint a Gauss függvény szigma paramétere a tárgytávolsággal egyenes arányban áll. A mélységbecslés történhet kép- [40] vagy frekvenciatartományban [41]. Mivel a konvolúció frekvenciatartományban szorzássá alakul, a legújabb publikációk kétdimenziós diszkrét Fourier transzformációt (2D DFT) részesítik előnyben.

A 2D DFT algoritmusoknak egy súlyos hátránya, hogy egyetlen globális távolságparamétert tudnak meghatározni, tehát csak a képsíkkal párhuzamos objektumok esetén alkalmazható, azaz ferde helyzetű objektumok esetében nem tudják lekövetni az elmosódás folyamatos térbeli változását.

Az általam javasolt módszer jelentősége, hogy fókuszsíkkal nem teljesen párhuzamos objektumok esetében is működik, valamint az éles tárgymodell ismeretében képes egyetlen szürkeárnyalatos kameraképből a tárgy térbeli elhelyezkedésére következtetni, tehát nincs szükség hozzá speciális, drága optikai eszközökre.

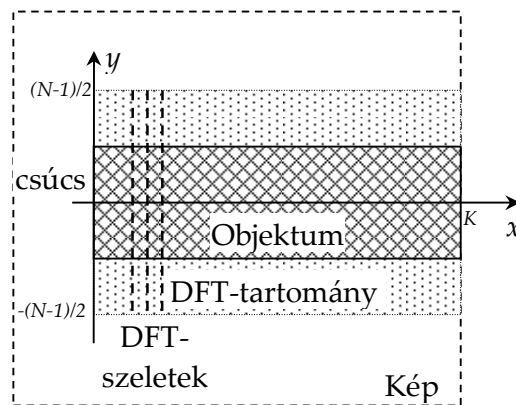
#### 4.3.2. Egydimenziós diszkrét Fourier transzformáció alapú mélységbecslési algoritmus

Adott a térben egy tengelyesen tükröszimmetrikus, hosszúkás, konvex, sík objektum. Az objektum csúcsának azt a pontot nevezzük, amelyben a hossz tengelye az objektum határvonalát metszi. A megoldandó feladat az objektum csúcsának mélységkoordinátája, valamint az objektum hossz tengelye és a képsík egymással bezárt szögének meghatározása.

Az algoritmus az alábbi feltételezésekből indul ki:

- az objektum csúcsa kamera látómezőjében található,
- az objektum ismert képfeldolgozási módszerekkel szegmentálással elkülöníthető a kameraképen szereplő többi objektumtól,
- az objektum nem fed át más objektumokkal,
- az általánosság megszorítása nélkül feltehetjük, hogy az objektum tengelye a képkoordináta-rendszer  $x$  tengelyével egybeesik. Ha ez nem teljesülne, akkor az előfeldolgozás során ez biztosítható.
- az objektum a tengelyére merőleges irányban a kamera képsíkjával párhuzamos helyzetű,
- az objektum éles képe korábbról ismert, és invariáns az objektum hosszanti tengelye mentén történő eltolásra,
- a kameraképen additív fehér Gauss zaj található, melynek paraméterei a kalibrációs fázisban meghatározhatók.

Az alábbi ábra szemlélteti a kamera által látott képtartományt



5. ábra: A kamerakép koordináta-rendszere, illetve a Fourier-transzformáció tartománya

A koordináta-rendszer  $x$  tengelye pedig a képsíkra merőleges, zérusát a fókusz síkban veszi fel. Az objektum mélységről az objektum határvonalán fellépő elmosódás szolgál meghatározó információval. Az  $y$  irányú egydimenziós diszkrét Fourier-transzformációt egyetlen szeletre elvégezve az alábbi összefüggés írható fel:



$$\mathfrak{S}_z^* = \mathfrak{S}_0 \mathcal{H}_g + \mathcal{F}\{\eta_z\} \quad (15)$$

amelyben  $\mathfrak{S}_0$  jelöli az objektum keresztmetszetének éles képe diszkrét Fourier-transzformáltját, amelyet nem szennyez mérési zaj. Ez  $x$  minden értékére azonos.  $\mathfrak{S}_z^*$  a kamera zajos képének  $z$  mélységben felvett Fourier-transzformáltja,  $\mathcal{H}_g$  jelöli a Gauss pontelmosódási függvény  $h_g(\mu_s, \sigma_s)$  diszkrét Fourier-transzformáltját. Ez frekvenciatartományban is Gauss függvény:  $\mathcal{H}_g(\mu_F, \sigma_F)$ , melynek paraméterei a képtartománybeli pontelmosódási függvény paramétereivel az alábbi formulával kifejezhetők:

$$\mu_F = \mu_s = 0, \quad \sigma_F = \frac{N}{2\pi * \sigma_s} \quad (16)$$

$\mathcal{F}\{\eta_z\}$  pedig a mérési zajt jelöli. A (15) egyenlet a látott kép spektrumának mesterséges előállítását jelenti.

A probléma az alábbi feladatra egyszerűsíthető: keressük a leginkább illeszkedő  $\mathcal{H}_g(0, \sigma_F)$  függvényt, amely a korábbról ismert éles képet mesterségesen elmossa úgy, hogy az eredmény a kamera által jelenleg látott képre leginkább hasonlítson. Az elmosódási függvény identifikált paraméteréből a mélységkoordináta visszazámítható az alábbi összefüggés alapján:

$$z = \lambda * \sigma_s = \lambda \frac{N}{2\pi * \sigma_F}, \quad (17)$$

Mivel az objektum a fókuszsíkkal  $\vartheta$  szöget zár be, az elmosódás mértéke  $x$ -től lineárisan függ:

$$\sigma_s(x, \sigma_{s_0}, \vartheta) = \sigma_{s_0} + \lambda^{-1} x * \tan \vartheta \quad (18)$$

ahol  $\sigma_{s_0}$  jelenti az elmosódási függvény az objektum csúcánál lévő szélességét. A transzformált elmosódási függvény paramétere a fenti összefüggésekből kifejezhető:

$$\sigma_F(x, \sigma_{s_0}, \vartheta) = \frac{N}{2\pi(\sigma_{s_0} + \lambda^{-1} x * \tan \vartheta)} \quad (19)$$

Az algoritmus a képfelvétel fényviszonyaira invarianciát kell mutatnia. A kontraszt és a fényerő változásai a képpontok fényességi értékeire lineáris transzformációként hatnak. Fourier transzformált térben a fényerő változó hatása a nulladik együtthatóban, a kontrasztarány pedig az összes együtthatónál egy konstans  $k$  szorzótényezővel jelenik meg.

Az eddig tárgyalt zavaróhatások ismeretében a mesterségesen előállított kép spektrumát leíró (15) egyenlet az alábbiak szerint módosul:

$$\mathfrak{S}_z^*(x, f) = k^{-1} \mathfrak{S}_0^*(x, f) \mathcal{H}_g(\sigma_F(x, \sigma_{s_0}, \vartheta), f) \quad (20)$$

ahol  $\mathfrak{S}_0^*$  a zajjal terhelt éles modell,  $f$  az  $y$  irányban végzett Fourier transzformáció futó változója,  $x$  a csúcstól mért távolság pixelben,  $k$  pedig a modellfelvétel és a jelenlegi képfelvétel közötti kontrasztarány. A felvett és a mesterségesen előállított két kép közti hasonlóságot a legkisebb négyzetek módszerével generált költségfüggvénnyel jellemezhetjük:

$$C(\sigma_{s_0}, k, \vartheta) = \sum_{x=0}^{K-1} \sum_{f=1}^N \left| \mathcal{H}_g(\sigma_F(x, \sigma_{s_0}, \vartheta), f) \mathfrak{S}_0^*(x, f) - k \mathfrak{S}_z^*(x, f) \right|^2 \quad (21)$$

A fényviszonyokkal szemben való invariancia érdekében a költségfüggvény nem tartalmazza a Fourier-transzformációból nyert egyenkomponenst, illetve a Fourier-transzformáció során nyert együtthatóknak csak az abszolút értékét veszi figyelembe. Ennek oka, hogy az együtthatók fázisa a komplex tartományban numerikus pontatlanságokból adódóan jelentősen eltérhet, míg az abszolútértékük a modell és a valós kép szeletei közötti nem teljesen pontos összerendeléstől kevésbé függ. A költségfüggvény tehát három paramétertől függ, ezek tetszőleges értékére a függvény numerikusan számítható, a minimuma így numerikus optimalizálással meghatározható. Olyan numerikus módszerek alkalmazhatók, amelyek nem

igénylik azt, hogy a költségfüggvény értéke a minimumhelyen zérus legyen, például a Newton-módszer, vagy (konjugált) gradiens módszer sikerrel alkalmazható.

A költségfüggvény minimumhelye ismeretében az identifikált paraméterek alapján a (17) összefüggésből számítható a fókuszsíktól való távolság, illetve közvetlenül adódik az optika kontrasztaránya és az objektum fókuszsíkkal bezárt állásszöge.

### 4.3.3. A tézis hasznosítása

A tézisben megfogalmazott mélységbecslési algoritmus előfeltételei valós körülmények között nem teljesíthetőek, annak gyakorlati alkalmazása során számos zavaró és torzító hatást kell kiküszöbölni. Az értekezés 4. szakasza részletesen taglalja az algoritmus gyakorlati alkalmazását egy hengerszimmetrikus mikromanipulátor pozíciójának becslésére, a mérés során fellépő gyakorlati problémákat, azok torzító hatásait, illetve megoldásait.

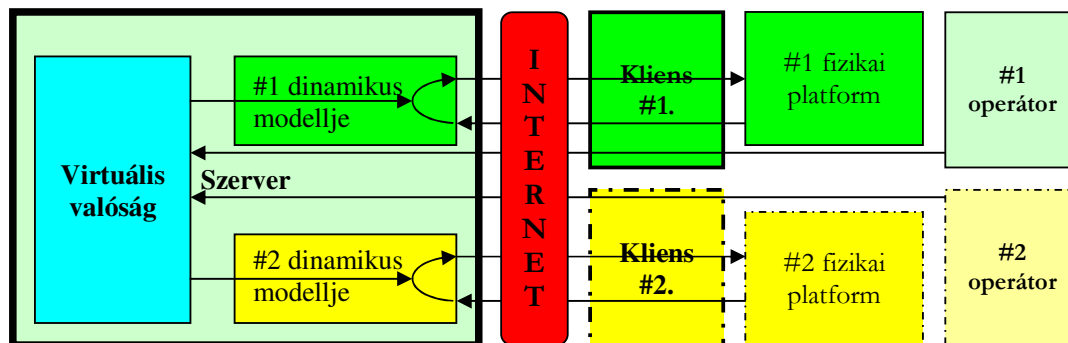
## 5. Eredmények hasznosítása

### 5.1. EMSER – humanoid teleoperációs platform

Az első és a második tézis valós rendszerekben történő alkalmazhatóságának együttes igazolására ad példát az alábbi multiágensű, többoperátoros telerobotikai rendszer. Ebben a konkrét esettanulmányban az első két tézisben megfogalmazott eredmények egy KHR-1 humanoid robotokból álló platformon kerültek hasznosításra.

Az 1. tézis architektúráját követő rendszer központi magját egy szerver oldali virtuális valóság (VR) adja, melyhez több – kliens oldali – fizikai teleoperációs platform szinkronizálандó. Ez a VR reprezentálja az operátorok parancsait feldolgozó felügyeleti modult. A szerver oldali világmodellben a robotok modelljével történő események kimenetele tekintendő annak a referenciamozgásnak, melyet a fizikai platformoknak végre kell hajtaniuk.

Minden egyes VR-beli referenciá-ágenst egy-egy operátor irányít. Az egyes platformok telerobotjai a megfelelő ágens fizikai kivetülései. A 2. tézisnek megfelelően ezen ágens feladatdekompozíciós moduljai az egyes platformok dinamikus modellje alapján optimalizált mozgásokkal szabályozzák a kliens oldali telerobotokat. A végrehajtás módja tehát az ágens feladat szintű vezérlőmoduljának saját döntése a második tézisben megfogalmazott pozíciójavító algoritmus alapján.



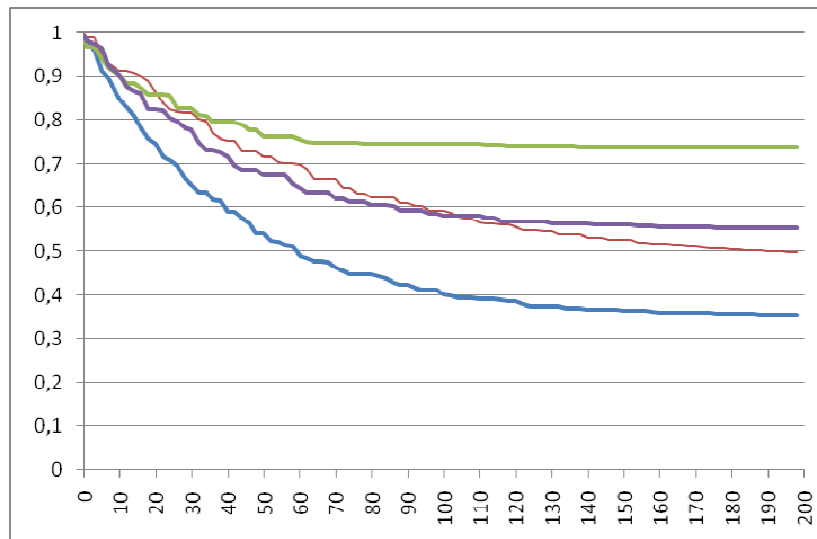
6. ábra: A 2. tézis alkalmazása egy multiágensű, többoperátoros telerobotikai rendszerben

A fizikai robotok ütközése a felügyeleti modul szolgáltatás szintjén történő előzetes vizsgálat alapján megelőzhető, az ütközés várható időpontja a virtuális valóságban megjósolható. A felügyeleti modul feladat szintje dönt arról, hogy ha egy adott mozgás indítása ütközést generálna, az egyes ütközések esetén mi a teendő. Két eset lehetséges:

- ha helyváltoztató mozgás során történne ütközés, akkor a felügyelő modul a mozgást nem engedélyezi;

- helyzetváltoztató mozgásnál a felügyelő modul feladat szintű modulja kinematikai szimulációval előállít egy új elemi mozgást, amely az ütközés időpontjáig megegyezik az indított mozgással, onnantól pedig ugyanaz a mozgás időben visszafelé játszva. Helyzetváltoztató mozgás révén ez nem veszélyezteti a robot stabilitását.

A robotok manuálisan előállított ideális és korrekciós helyzetváltoztató mozgásainak optimalizációja a 2. a) tézisben leírtaknak megfelelően történt. Példaként egy előre tett lépés ideális elemi mozgása  $K=9$  mozgásp primitívből (kulcspozícióból) áll. A robot  $J=21$  csuklót változója miatt az  $\mathbf{x}$  vektor  $K \cdot (J+1) = 198$  dimenziójú. Az algoritmus futtatása a konjugált gradiens ajánlása alapján ennyi lépésig történt. A  $\chi$  relatív alakulását az iterációs lépések során a  $t=0$  kezdő pillanatbeli értékével normalizálva az alábbi ábra mutatja:



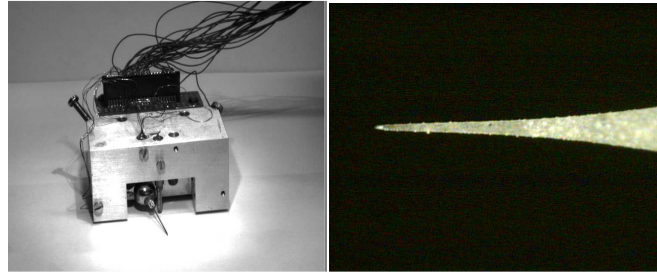
7. ábra: A norma függvény alakulása négy helyzetváltoztató mozgás optimalizálása során

Látható, hogy az algoritmus az dimenziószámmal megegyező lépésszám alatt megtalálja a minimum környezetét, miközben a hibanorma monoton csökken. Az algoritmust a numerikus pontatlanságok miatt, illetve a költségfüggvény nem négyzetes volta miatt bizonyos lépésközönként újra kellett indítani, azaz a konjugált irány nullázásával ismét a gradiens irányába kellett indulni. Végeredményben az algoritmus 25-65%-ot is képes volt csökkenteni a hibanormán, azaz az eredő mozgás a dinamikus hatások ellensúlyozásával a legkedvezőbb esetben majdnem háromszor jobban közelítette a kinematikai úton tervezett referenciamozgást.

## 5.2. A MINISTER mikromanipulációs munkacella

A BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke és a Karlsruhei Egyetem Folyamatszabályozási és Robotika Intézete (IPR) közös kutatási projekt keretében hozta létre a MINISTER mikromanipulációs munkaállomást mikroszkopikus anyagok nagy pontosságú pozícionálásának kutatására.

A MINISTER munkaterülete egy 200x300mm-es üveglemez, melynek felszínén a 30x30x60mm-es robottest 6 szabadságfokú mozgásra képes. A robot helyzetét egy kétszintű vizuális szenzorrendszer határozza meg. A teljes munkaterületet átlátó kamera a robottest helyzetének milliméter pontosságú meghatározásáért felelős, míg a másik egy mikroszkópon keresztül egy kisebb területet figyel, és itt biztosítja a mikrométeres pontosságot. Mindkét kamera egy PC-hez csatlakozik, amely a kép feldolgozásáért és kiértékeléséért felelős.



8. ábra: A MINISTER mikrorobot és manipulátora

A MINISTER mikrorobot teleoperációs környezetben történő alkalmazását elsőként tudományos diákköri dolgozatban [14], később a Híradástechnikában [1] publikáltam. Egy másik tudományos diákköri dolgozatban [15] javaslatot tettem egy felügyelet nélküli, autonóm multiágensű mikrorobotikai rendszerre, amely több robot munkáját hangolja össze, elméleti eredményemet szimulációkkal igazoltam.

A telerobot és a kezelő rendszer közti kommunikáció lehetőségeit [2] és [3] taglalja. Az így kialakított teleoperációs munkacellából kísérleti laboratóriumi mérés is készült [10]. Az INES2002 konferencián [4] javaslatot tettem hierarchikus szenzorrendszerekkel ellátott állomások kétszintű hierarchikus vezérlésére.

Az első tézisemet, a NASREM hatszintű hierarchia multiágensű rendszerekre történő általánosítását az INES2003 [5], illetve a FRAKAD2003 konferenciákon [6] publikáltam. Mindkét esetben a kísérleti platform a MINISTER munkaállomás volt. A robotok intelligens vezérlését a központi felügyelő számítógépen implementált elosztott algoritmus valósította meg, az eredményeket fizikai megvalósítás híján szimulációval támasztottam alá.

Az első tézis eredményei egy teljesen más jellegű környezetben, a fent ismertetett EMSER platformban is hasznosíthatónak bizonyultak [9].

### **A MINISTER manipulátorának mélységbecslése**

A MINISTER mikroszkópra szerelt kamerája a nagy nagyítás következtében igen kis mélységélességgel rendelkezik, tehát teljesül rá a harmadik tézis előfeltétele. Implementáltam az algoritmust, és kísérletképpen implementáltam a szakirodalomban található kétdimenziós Fourier-transzformáción alapuló „hagyományos” mélységbecslési módszert is. A kísérleti futtatás eredményeit regresszióanalízis módszereivel értékeltem ki. Az algoritmusok pontossága a becslési reziduumok szórásával jellemezhető. Az alábbi táblázat foglalja össze a tanító (R) és a verifikációs (V) mintán végzett becslésekből, valamint ezen becslések különbségéből előálló reziduumeloszlások tapasztalati szórását.

1. táblázat: Az egydimenziós és a hagyományos kétdimenziós mélységbecslési algoritmus pontossága

	$\sigma(z - \hat{z}_R)$	$\sigma(z - \hat{z}_V)$	$\sigma(\hat{z}_V - \hat{z}_R)/\sqrt{2}$
A 3. tézis 1D DFT-n alapuló algoritmus	8.75	6.07	5.47
A hagyományos 2D algoritmus	14.83	14.73	12.73

A fenti táblázat, értekezés 4.6 pontja, valamint a [7] és [8] publikációim igazolják, hogy az általam javasolt egydimenziós DFT-n alapuló mélységbecslési algoritmus a vizsgált konkrét esetben robosztusabb és pontosabb eredményt szolgáltat, mint a szakirodalomban létező, hozzá hasonló kétdimenziós DFT-re épülő más mélységbecslési algoritmusok. Alkalmazásával a manipulátor hegyének mélységkoordinátáját körülbelül feleakkora hibával lehet megbecsülni, mint a korábban létező, hozzá hasonló eljárásokkal.

## A tézisekben hivatkozott tudományos közlemények

- [1] Urbancsek T., Lassó A.: *Mikromanipulátorok teleoperációs alkalmazása biotechnológiai kutatásokban*, Híradástechnika, HU ISSN 0018-2028, 2000/11. pp. 36-43.
- [2] Lassó A., Urbancsek T.: *Communication architectures for web-based telerobotic systems*, MED '01, Dubrovnik, Croatia, Section: Networks and Internet, 2001.06.28, Proceedings of 9<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, ISBN-953-6037-35-1, Paper no. 068 (4 pages)
- [3] Urbancsek T., Vajta L.: *Ferngesteuerte mikrorobotische Manipulationszelle für sichere biotechnologische Forschungen*, München, 2002.04.30, Wissenschaftliche Mitteilungen der 14. Frühlingsakademie, Budapest, 2002, ISBN 963 86234 5 4, pp. 114-120
- [4] Urbancsek T., Vogel M.: *Sensing and Monitoring Methods in Telerobotical Applications Fusing Real-time Video Transmission and Calibrated Virtual Reality*, INES 2002, IEEE proceedings pp. 107-110, Opatija, Croatia, 2002.
- [5] Urbancsek T., Vajda F.: *Internet Telerobotics for Multi-Agent Mobile Microrobot Systems - A New Approach*, Assiut - Luxor, Egypt, 2003.03.05, IEEE Proceedings of the INES 2003 conference, ISBN 977-246-048-3, ISSN 1562-5850, pp. 462-466.
- [6] Urbancsek T., Vajta L.: *Erweiterung des NASREM Referenzmodells für Multi-Agenten Telerobotersysteme*, Balatonfüred 2003.05.17, Wissenschaftliche Mitteilungen der 15. Frühlingsakademie, pp. 71-77, Budapest 2003, ISBN 963 214 1180, pp. 71-77
- [7] Urbancsek T., Garay Cs., Vajta L.: *3D Spatial Coordinate Estimation of a Micro Manipulator From a Monocular Camera Image Using DFD Algorithm*, International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping, Genova, Italy, 2004.07.01., Proceedings of the IMG04 Conference, ISBN 88 900 426-1-3, pp. 337-342.
- [8] Urbancsek T., Vajta L.: *Ein Maschinensichtsystem für Tele-Mikrorobotik – 3D Positionsschätzung eines beinahe zylindrischen Objekts aus einem einzelnen Kamerabild*, München 2004.05.19, Wissenschaftliche Mitteilungen der 16. Frühlingsakademie, Budapest, 2004, ISBN 963 86697 0 5, pp. 118-129. (Német nyelven)
- [9] Dálnoki Á., Helybély Á., Juhász T., Kálmán V., Urbancsek T., Vajda F., Vajta L.: *Rendszer és eljárás valós objektumok mozgására virtuális térben végrehajtott műveletekkel*, Lajstromszám: P0600879, Közzététel éve: 2006
- [10] Arató P., Vajta L., Urbancsek T., G. Chamilothis: *Design of an Internet-Based Tele-Microrobotic Laboratory Assignment*, Tallinn, 2006, IEEE International Conference on Computational Cybernetics, ISBN: 1-4244-0071-6 IEEE Catalog Number: 06EX1270, pp. 97-100.
- [11] Vajta L., Vajda F., Urbancsek T., Juhász T., Kálmán V., Vogel M., Helybély Á.: *EMSER – Kutatási jelentés*, 3DMR – IIT, BME, 2007. jan. 23.
- [12] Juhász T., Urbancsek T.: *Beyond the limits of kinematics in planning keyframed biped locomotion*, Proc. of 6<sup>th</sup> Eurosim Congress on Modelling and Simulation, 9<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> September 2007, Ljubljana, Slovenia, Vol-1 (abstracts), p. 78.
- [13] Juhász T., Urbancsek T.: *Beyond the Limits of Kinematics in Planning Keyframed Biped Locomotion*, Periodica Polytechnica (elfogadva)

## További saját tudományos közlemények

- [14] Lassó A., Urbancsek, T.: *Mikromanipulátorok teleoperációs alkalmazása biotechnológiai kutatásokban*, BME VIK TDK dolgozat, 2000, OTDK 2001, p. 70.
- [15] Urbancsek T., Helybély Á.: *Viselkedésorientált vezérlésű miniatürizált robotrendszerek elsősorban mikrobiológiai alkalmazásra*, BME VIK TDK dolgozat, 2001, OTDK 2001, p. 68.
- [16] Lassó A., Urbancsek T., Helybély Á.: *Microrobot Teleoperation through WWW*, microCAD 2001 Miskolc, 2001. március 1-2, Section J 'Gábor Dénes' Applied Information Engineering, Proceedings of MicroCad 2001 International Scientific Conference ISBN 963 661 457 1, ISBN 963 661 467 9, Miskolc, 2001 pp. 133-138.
- [17] Urbancsek T. (szerk.): *Wissenschaftliche Mitteilungen der 14. Frühlingsakademie*, München, Németország, 2002.04.30-2002.05.05., Logod Verlag, 2002. 134 p.
- [18] Jäkel H., Urbancsek T., Thierer C.: *A Note on the Calculation of a Discrete-Event-System's Transfer Function*, Hänsel-Hohenhausen, Frankfurt., 2002.05.30, ISBN-10: 3826712110, ISBN-13: 978-3826712111, (Ed: U. Kiencke, K.Dostert), pp 61-66.
- [19] Vajda F., Urbancsek T.: *High-Level Object-Oriented Program Language for Mobile Microrobot Control*, Assiut - Luxor, Egypt, 2003.03.05, IEEE Proceedings of the INES 2003 conference, ISBN 977-246-048-3, ISSN 1562-5850, pp. 458-461.
- [20] Urbancsek T. (szerk.): *Wissenschaftliche Mitteilungen der 15. Frühlingsakademie*, Balatonfüred, 2003.05.17-2003.05.23., Logod Verlag, Budapest, 2003. 82 p.
- [21] Urbancsek T. (szerk.): *Wissenschaftliche Mitteilungen der 16. Frühlingsakademie*, München, Németország, 2004.05.19-2004.05.23., Logod Verlag, Budapest, 2004. 138 p.
- [22] Urbancsek T. (szerk.): *Wissenschaftliche Mitteilungen der 17. Frühlingsakademie*, Balatonfüred, 2005.05.04-2005.05.08., Logod Verlag, Budapest, 2005. 156 p.
- [23] Urbancsek T.: *Neue Algorithmen in der VR-Basierten Internet Telerobotik*, Balatonfüred 2005.05.04, Wissenschaftliche Mitteilungen der 17. Frühlingsakademie, Budapest, 2005, ISBN 963 86697 3X pp. 129-131.
- [24] Vajta L., Urbancsek T., Vajda F., Juhász T.: *Comparison of Different 3D (Stereo) Visualization Methods - Experimental Study*, Proc. of 6<sup>th</sup> Eurosim Congress on Modelling and Simulation, 9<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> September 2007, Ljubljana, Slovenia, Vol-1 (abstracts), p. 351
- [25] Urbancsek T., Vámos G.: *Szakértői rendszer készítése Video-On-Demand tartalmak kölcsönzésének előrejelzésére felhasználói profil-képzés technikájával*, Kutatási jelentés, IIT, BME, 2007. nov. 4.

## Irodalomjegyzék

- [26] Nagy I, Vajta L, Gürtler Cs.: *Vision Based Navigation for Multi-agent Mobile Robot System in the Transport Domain*, Proceeding of the INES 97., Budapest, Magyarország, 1997
- [27] Arató P, Vajta L, Felső G.: *Visual Sensoric for Microrobot Systems*, Proceedings of the IIIS World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Caracas, Venezuela, 1997.06.07-1997.06.11., pp. 1-5.
- [28] Tél F, Kahlesz F, Lantos B: *Intelligent stereo vision system for robot control*, Proc. 9th Mediterrian Conference on Control and Automation MED01. Dubrovnik, Horvátország, 2001, pp. 1-6.
- [29] Vajda F.: *Optimal Landmark Arrangement and Programming in the Field of Heterogeneous Multiagent Microrobotic Systems*, BME PhD disszertáció, 2006
- [30] Felső G.: Mikromanipulációs robotrendszerek modellezése és vizuális alapú pozíciómérési eljárásai, BME PhD disszertáció, 2007
- [31] Albus J. S, McCain H. G., Lumia R.: *NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture (NASREM)*, NBS Tech Note 1235.
- [32] Sheridan T.B.: *Telerobotics, automation and human supervisory control*. Cambridge, MA: MIT Press., 1992
- [33] Arkin, R. C.: Behavior-Based Robotics, MA. MIT Press., 1998
- [34] Ali K. S.: *Multiagent Telerobotics: Matching Systems to Tasks*, PhD Thesis, GIT, 1999
- [35] Sardain P., Bessonnet G.: *Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point*; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Volume 34, Issue 5, Sept. 2004, pp. 630-637.
- [36] Vukobratović M., Borovac B.: *Zero-moment point - Thirty five years of its life*. International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1, No. 1, pp. 157-173, 2004
- [37] Juhász T., Schmucker U.: *Automatic Model Conversion to Modelica for Dymola-based Mechatronic Simulation*; Proc. of 6th International Modelica Conference, 3rd-4th March, 2008, Bielefeld, Germany, Vol. 2, pp. 719-726.
- [38] Wikipedia: *Nonlinear conjugate gradient method*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear\\_conjugate\\_gradient](http://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_conjugate_gradient)
- [39] Pentelard A. P.: *A new sense for detph of field*. IEEE Transactions on PAMI, vol. 9, No.4, 1987, pp. 525-531
- [40] Wei T.: *Three Dimensional Machine Vision Using Image Defocus*, PhD Dissertation at Stony Brook University, NY, 1994
- [41] Ghita O., Whelan P. F.: “*Real time 3-D estimation using detph from defocus*”, Proc. Irish Machine Vision and Image Processing Conference, Dublin, 1999 pp. 167-181.
- [42] Kondo KHR series product page: <http://www.kondo-robot.com/EN/wp/?cat=10>
- [43] AIBO: [http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press\\_Archive/199806/98-052](http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/199806/98-052)
- [44] ASIMO: [http://asimo.honda.com/asimo\\_specifications.html](http://asimo.honda.com/asimo_specifications.html)
- [45] Dymola, DynaSim (Dassault Systemes) Lund, Svédország: <http://www.dynasim.se>
- [46] Modelica Association – <http://www.modelica.org>