

**SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM**  
**Természettudományi és Informatikai Kar**

**Informatikai Tanszékcsoport**

**Műszaki Informatika Tanszék**

SZTE Informatika Doktori Iskola

**Robot aktuátor, trajektória követés és fuzzy  
irányítás optimalizálása**

Tézisfüzet

**Szépe Tamás**

*Témavezető*

**Dr. Mester Gyula**

Szeged, 2015

# 1. Bevezetés

Az irodalomban a "robot" szó definiálására sokféle megközelítés létezik. A legtöbb értelmezés a robotot egy olyan autonóm vagy számítógéppel vezérelt gépként határozza meg, amely egy specifikus feladat végrehajtására alkalmas. A "robot" szó először 1921-ben, Karel Čapek drámájának megjelenésével került be a köztudatba, R.U.R. (Rossum's Universal Robots) címmel, amelyben "elektromechanikus eszköz" megnevezés helyett, a cseh "robota" szót szintetikus humanoid leírására használták [13].

A robotikai eszközöket kisebb csoportokba érdemes besorolni hogy mélyebb rálátást nyerhessünk a különböző tervezési megközelítésekre. Sokféle klasszifikációt használhatunk pl. a szabadsági fokok száma, az implementált intelligencia szintje [14] vagy felhasználási módjuk, illetve a mozgásuk típusai alapján [15]. Az ipari, háztartási vagy katonai robot besorolása az előbbire, míg a kerekes illetve járó robotok besorolása a helyváltoztatási vagy kinematikai szempontok szerint szétválasztható kategóriába tartoznak.

Egy újonnan kialakult terület az ún. kollaboratív robotika, ahol a háztartásokban használt robotoknál alkalmazott fontos szempontot, a felhasználói biztonságot igyekeznek átültetni az ipari manipulátorok világába is. Ezért az alap kutatások egy része a pneumatikus műizmok (PAM, pneumatic artificial muscle) felhasználási lehetőségei felé irányul, mivel ezek az aktuátorok eredendően rugalmasak, ezért kiválóan alkalmasak akár kollaboratív, vagy akár lépegető robotok fejlesztésére is. Egy másik fő alap kutatási irány a megfelelő pontosságú trajektória követés megvalósítása, mely egyaránt fontos mind kerekes, mind pedig lépegető robotok esetében is. Mindezekon felül, minden robotikai fejlesztés alapja a megfelelő szabályozás alkalmazása, így pl. a fuzzy szabályozó rendszer is megfelelő választás lehet a hatékonyabban működő aktuátorok fejlesztéséhez vagy hasznos lehet akár magasabb szabályozási szintekhez is.

Az első tézispontban a PAM technológia területen elért új eredményeimet foglalom össze. A második és harmadik tézispontban a trajektória követés illetve a Fuzzy szabályozó rendszerek terén elért új eredményeimet mutatom be.

## 2. Átviteli függvény optimalizálása és új erő-nyomaték áttétel kidolgozása (PAM) aktuátorokhoz

A különböző aktuátorok az elmúlt évtizedekben egyre olcsóbbá és erősebbé váltak, ezért egyre nagyobb figyelem fordult az automata feldolgozók felé. A robot manipulátorknál a hatékonyság folyamatosan javul, azonban az utóbbi időben egy új szempont különleges figyelmet kapott, név szerint a "felhasználói biztonság". A pneumatikus műizmok viszonylag új, nem konvencionális aktuátoroknak számítanak. A klasszikus aktuátorokhoz képest számos előnnyel rendelkeznek, pl. az extrém erő/súly illetve erő/méret arányok számítanak a legfőbb szempontnak a gyakorlati alkalmazásoknál. A PAM aktuátorok robotmanipulátor csuklójaként is kiválóan alkalmazhatóak, így ugyanis rugalmas felépítésüknek köszönhetően a belőlük készült robotmanipulátor is rugalmas lesz.

A PAM-ek egyszerű felépítésükből adódóan olcsó konstrukciók, azonban szabályozásuk nehézkes, mivel az általuk generált erő nemlineáris karakterisztikát mutat. A fő probléma az, hogy a PAM által produkált maximális erő egy rögzített nyomáson az összehúzódás nemlineáris függvényeként fejezhető ki. Azaz, közel 0 %-os kontrakciónál (nyugalmi állapotban) a PAM nagymértékű erő kifejtésére képes, viszont ez hirtelen és nemlineárisan csökken a maximális kontrakció felé haladva. Az aktuátor viselkedésének pontosabb modellezése elengedhetetlen egy PAM-et alkalmazó, megbízható és precíz rendszer létrehozásához.

Ennek megvalósításához kiindulásként egy exponenciális függvényt választottam, amely képes leírni a statikus összefüggést az erő ( $y$ ), a kontrakció ( $\kappa$ ) és az ehhez szükséges nyomás ( $p$ ) között. Vizsgálataim azt mutatták, hogy trigonometriai vagy alacsonyabb rendű polinomok helyett, inkább az exponenciális függvény biztosítja a legjobb közelítést az adatpontok dinamikus változásának. Az (1)-es egyenletnél megadott exponenciális függvény csak négy ismeretlen paramétert használ, és képes a kontrakció és az erő közötti összefüggést rögzített nyomás mellett nagy pontossággal kifejezni.

$$F_{core}(\kappa) = a \exp\left(\frac{1}{\kappa+b}\right) + c\kappa + d \quad (1)$$

Ahol  $(a, b, c, d)$  ismeretlen paraméterek.

A következő lépés az volt, hogy az alap függvény néhány paraméterét a nyomástól függővé tegyem, amely így már egy általános összefüggést megadó, un. átviteli függvényt ad meg. A függvény általános alakját a (2)-es egyenlet mutatja, mely mindössze hat ismeretlen paramétert használ fel.

$$F_y(p, \kappa) = (ap + b) \exp\left(\frac{1}{\kappa+c}\right) + (d\kappa + e)p + f \quad (2)$$

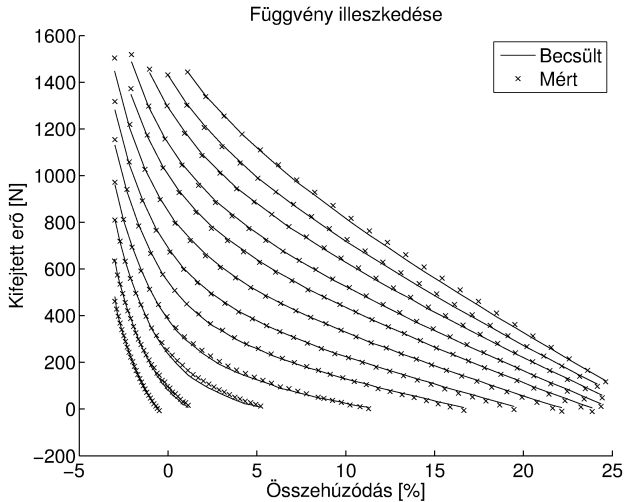
Ahol  $(a, b, c, d, e, f)$  ismeretlen paraméterek.

A (2)-es egyenletből a  $p$  értéke kifejezhető, amivel az átviteli függvény inverz függvényét (3) kapjuk.

$$F_p(\kappa, y) = -\frac{b \exp\left(\frac{1}{\kappa+c}\right) + f - y}{a \exp\left(\frac{1}{\kappa+c}\right) + d\kappa + e} \quad (3)$$

Ahol  $(a, b, c, d, e, f)$  ugyanazon ismeretlen paraméterek, mint a (2)-es egyenletben.

A mért és az új átviteli függvénnyel becsült adatokat az (1)-es ábra mutatja.



1. ábra. Mért és becsült adatok összehasonlítása a PAM működése során

A továbbiakban egy 2009-ben publikált átviteli függvényt használtam fel (részletek a [6]-ben találhatóak), amellyel az új függvény modellező képességét hasonlítottam össze. Ennek eredményéül kimutattam, hogy az új függvény 7,1 %-al kisebb RMSE értéket adott a teljes működési tartományra a 2009-es eredményekhez képest.

Továbbá az újonnan leírt átviteli függvény egyszerűsége miatt nagyfokú pontosság érhető el kevesebb mérési pont felhasználása mellett is, amely nagyon fontos szempont lehet egy PAM aktuátort használó eszköz újrakalibrálásánál. Eredményeimmel kimutattam, hogy csupán 9 mérési pont megfelelő kiválasztásával, közel olyan pontosságú kalibrálás érhető el, mint az összes 340 pont felvételével.

További előnye a PAM-ek aktuátorként való alkalmazásának, hogy robotcsuklókba is beépíthetők bonyolult áttételek, mint pl. "bolygómu" [16] vagy "hullámhajtás" [17] használata nélkül is. Ennek ellenére, a PAM-ek nemlineáris karakterisztikája miatt ezen alkalmazások szintén nehezen kivitelezhetőek. Ugyanis klasszikus, korong alakú áttételi rendszerek használata során, a  $T_{useful}$  hasznos nyomaték általában csupán harmada az elméleti maximumnak, de legjobb esetben is alig éri el ennek felét.

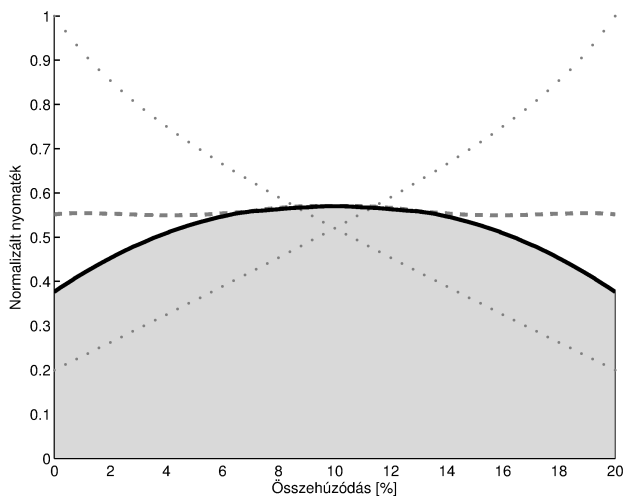
Ezek alapján kifejlesztettem egy olyan "csiga" formájú áttételt, amely képes javítani az erő-nyomaték átviteli karakterisztikán. Ennek érdekében egy keretrendszer fejlesztettem, mely különböző geometriájú áttételek definiálására is alkalmas, valamint képes nem csupán zárt alakban megadott függvényekkel, hanem numerikusan kifejezett geometriákkal dolgozni. A szimulátor képes a különböző geometriájú központi forma esetén a szimulált PAM kontrakciója és az áttétel elfordulása közötti összefüggéseket meghatározni. Az PAM-ek erő-nyomaték áttételének hatékonyságának növelésére ezzel a keretrendszerrel optimalizáltam egy új központi alakzatot.

A keretrendszer tesztelését egy normál koncentrikus, illetve az optimalizált csiga alakkal rendelkező áttételek összehasonlításával végeztem el, figyelembe véve az optimalizált áttétel által kifejezhető maximális nyomaték növekedését. Ez utóbbihoz, a központi forma  $r_s$  sugarát a  $\theta$  szög harmadfokú polinomjaként fejeztem ki az alábbi összefüggéssel:

$$r_s(\theta) = f_1\theta^3 + f_2\theta^2 + f_3\theta + f_4 \quad (4)$$

Ahol a hiányzó  $f_i$  együtthatókat genetikus algoritmussal határoztam meg.

A szimuláció eredménye a nyomaték jelentős javulását mutatta a teljes működési tartományban a csiga alakú áttétel alkalmazása során, ami a (2)-es ábrán látható.



2. ábra. A normalizált nyomaték értékeket a szaggatott vonal jelzi antagonisztikus elrendezésű PAM aktuátorok és a csiga formájú áttételi rendszer felhasználásával. A  $T_{useful}$  hasznos nyomatékot a szürkével jelölt terület jelzi a műizom maximális kontrakciójának függvényében a maximális üzemi nyomás mellett. Az Y tengely a referencia nyomatékokra (pontosított vonal) normalizált

Az optimalizált áttétel nyomaték értéke átlagosan 42,8 %-al növekedett a normál, koncentrikus áttételt használó elrendezéshez képest, valamint a maximálisan kifejthető nyomaték értéke 9,53 %-al növekedett úgy, hogy a működési tartomány és a felhasznált aktuátorok minden paramétere ugyanaz maradt.

A különböző geometriájú áttételek validálására egy kísérleti berendezést is készítettem. Segítségével az optimalizált csiga áttétel működtetése során nagyfokú korrelációt mutattam ki a szimulált és a valódi, mért értékek között. A különbség maximális mértéke a mért értékhez képest elenyésző, mindössze 1,6 % volt.

### 3. Trajektória követés optimalizálása a "pure pursuit" trajektória követő eljárással

A kerekeken guruló robotok esetében a navigáció az egyik legfontosabb kutatási terület. A trajektória tervezése és követése ismert és ismeretlen környezetben a legalapvetőbb irányítási problémák közé tartozik az autonóm robotok esetében.

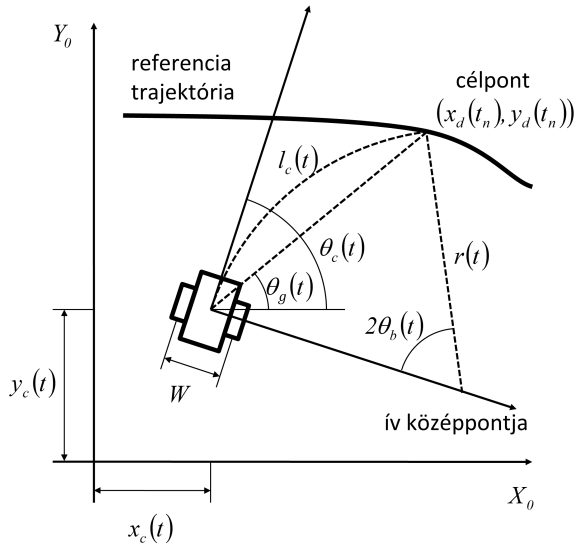
A trajektória tervezés feladata a megfelelő, időfüggő útvonal előállítás, amely egy adott robotot az egyik pozíciójából egy másikba képes navigálni az ismert akadályok elkerülésével a kivitelezhető legrövidebb idő alatt. A trajektória követés feladata viszont az, hogy a robot folyamatos irányítása mellett a tervezett trajektóriát az előre kiszámított sebességekkel bejárja a követési hibák kompenzálásával.

A geometria-alapú "pure pursuit" útvonalkövető módszer lényege, hogy a robotot egy körív mentén kell irányítani, ami az aktuális pozíciót a referencia útvonalon lévő célpozícióval köti össze. A rögzített hosszúságú körív ezáltal rögzített előrettekintési távolságot fog reprezentálni. Nyilvánvaló, hogy az eredeti "pure pursuit" egy tisztán útvonal követési módszer, amely nem veszi figyelembe az útvonal megtételéhez szükséges idő tényezőjét. Ezért kidolgoztam egy olyan új, trajektóriák követésére alkalmas eljárást, amely az eredeti útvonal követési eljárástól eltérően az út megtételéhez szükséges végrehajtási időt is figyelembe veszi, ezáltal megbízhatóbbá és pontosabban kivitelezhetőbbé is teszi a trajektóriák követését. Mivel ilyenkor a robot egy előre legenerált trajektóriát követ, ezáltal a mozgás során a robot minden lényeges fizikai képességeit (maximális sebesség, gyorsulás, stb.) pontosan figyelembe lehet venni.

A tézispontban kifejtett eljárásban az előre lerögzített előrettekintési távolságot úgy változtattam meg, hogy ez az idő függvényében folyamatosan frissülésre kerüljön a tervezett trajektóriát figyelembe véve. Az itt bemutatott megoldás a robot aktuális és a tervezett útvonalon  $n$  szabályozási ciklust követően elérni kívánt pozíciója közötti távolsághoz igazítja az előrettekintés mértékét. A bevezetett  $n$  paraméter mértéke intuitíven meghatározható annak érdekében, hogy mind a robot stabilitása, mind pedig az útvonalkövetés hibájának mértéke megfelelő legyen. A megadott távolságból a robot két pozícióját összekötő ív alakja is kiszámítható, így a kerekek



sebessége valós időben is számítható ahogyan a (3)-as ábra mutatja.



3. ábra. A kifejlesztett "pure pursuit" trajektóriakövető algoritmushoz felhasznált összefüggések és jelölések

Az ebben a tézispontban kifejlesztett megközelítés az eredeti útvonalkövető módszerrel szemben valós idejű trajektória követést hajt végre, amely nagy megbízhatóságot alacsony követési hibával párosít. Továbbá a hagyományos trajektóriakövető megoldásoknál szükséges tuningoló és csillapító paraméterekre ennél a módszernél nincsen szükség.

A "pure pursuit" trajektória követő módszert leíró algoritmus a következő műveletek iterálásával valósítható meg:

1. Tervezzük meg a trajektóriát egy tervező eljárással, hogy megkapjuk a robot tervezett időfüggő állapotát  $\mathbf{q}_d(t_n)$ -et és a trajektória szegmensének bejárásához szükséges ( $f$ ) legrövidebb időt
2. Amíg  $t \leq f$

- (a) számítsuk ki:  $\mathbf{q}_d(t_n)$
- (b) számítsuk ki  $v_r(t)$  és  $v_l(t)$  értékeket
- (c) vezérlejük a robotot "Set Speed" paranccsal ( $v_r(t)$ ,  $v_l(t)$ ) értékekkel
- (d) frissítsük az odometriát
- (e) frissítsük a mintavételi időt

### 3. vége

A kísérleteket a differenciál meghajtású Koala II roboton végeztem el. Mind az előrecsatolt, mind az állapotkövető eljárások, mind pedig a "pure pursuit" trajektóriakövető eljárásokat többszöri futtatásuk alapján hasonlítottam össze. Eredményül az újonnan kifejlesztett eljárás közel ötödére csökkentette a pozíció és az orientációban mérhető hibákat a teszt trajektória esetében a két állapotkövető eljáráshoz képest.

## 4. Új fuzzy aritmetika alapú szabályozók implementálása, alkalmazása és kiértékelése

A fuzzy szabályozás a fuzzy logikán alapuló szabályozási folyamat. Képes valós és nem csupán bináris számok feldolgozására is, amit a fuzzy tagsági függvények tesznek lehetővé.

Más szabályozó eljárásokhoz hasonlóan a fuzzy irányításnál is alapvető fontosságú a bemenetek ( $X$ ) és a kimenetek ( $Y$ ) segítségével a külvilág felé irányuló kapcsolat megteremtése. Ezekon keresztül a kommunikáció mindvégig valós számok segítségével zajlik, így könnyen integrálható lesz nagyobb rendszerekbe is.

A fuzzy nyelvi változó, más néven tagsági függvény képes leképezni egy pontos bemeneti értéket ( $x$ ) a fuzzy világába. Általános esetben a tagsági függvényt a következő függvénnyel adhatjuk meg:  $\mu : X \rightarrow [0, 1]$ , ami képes egy adott  $x \in X$  igazságát meghatározni a  $\mu$  függvény segítségével. Amennyiben egy bemeneti  $x$  érték jól reprezentálja a  $\mu$  függvényt, úgy  $\mu$  az  $x$ -et 1-hez közeli értékre képezi le, illetve ha  $x$

nem jellemzi a  $\mu$  függvény által kifejezett tulajdonságot, akkor az  $x$ -et 0-hoz közeli értékre fogja leképezni.

Egy Mamdani típusú fuzzy szabályozó kimenetén a bemenetiekhez hasonló tagsági függvények vannak definiálva, melyek együttese meghatározza a teljes szabályozó kimenetét.

A fuzzy szabályozók belső működését a szabályok határozzák meg, melyek összekapcsolják a bemeneteket a kimenetekkel. Egy fuzzy szabálybázis  $r$  darab szabályból áll, melyek általános alakja a következő:

$$IF\ x_1\ IS\ P_s^1,\ x_2\ IS\ P_s^2,\ \dots,\ x_m\ IS\ P_s^m\ THEN\ y\ IS\ Q_s,$$

ahol  $P_s^l$  (és  $Q_s$ ) lingvisztikai függvények, melyek  $X_l$  (és  $Y$ ) változókon értelmezettek és  $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]$  bemeneti értékek ( $s = 1, \dots, r$  és  $l = 1, \dots, m$ ) esetén.

A fuzzy szabályozó működtetéséhez az előbb meghatározott "IF ... THEN ..." formátumú szabályokból álló bázist kell kiértékelni. Az "IF ..." részét a szabálynak antecedensnek, míg a "THEN ..." részét konzekvensnek nevezzük. A működés során először minden  $r$  szabály antecedense kerül kiértékelésre adott bemeneti értékek mellett. Egy antecedens tartalmazhat egy vagy több tagsági függvényt, melyeket "NOT", "AND" vagy "OR" típusú fuzzy operátorokkal lehet kombinálni. Mivel a klasszikus implementációi ezeknek a műveleteknek az  $(1 - x)$ ,  $min$  és  $max$  függvényekkel történik, így az antecedensek kiértékelése számításilag hatékonyan megvalósítható. A kiértékelést elvégezve adott  $x$  bemenethez előáll minden szabály illeszkedési mértéke, avagy igazsági foka.

Ezeket az igazsági fokokat az implikáció művelete során rendelhetjük a konzekvenssekhez. Az implikáció klasszikus implementációja a  $min$  függvénnyel történik. A művelet eredményeképpen minden konzekvenshez hozzárendelődik az antecedensének igazsági mértéke. Elméletben a konzekvens is állhat több tagsági függvény fuzzy operátorokkal történő kombinációjából, de a gyakorlatban itt jellemzően egyetlen tagsági függvény áll.

A következő lépés, hogy előállítsuk a komplex kimeneti ( $A(y)$ ) tagsági függvényt az implikált konzekvenssek segítségével. Ezt a műveletet hagyományosan aggregációnak nevezik és a  $max$  függvénnyel valósítják meg.

Utolsó lépésként az összetett kimenetet leíró tagsági függvény legjellemzőbb ( $y^*$ ) elemét kell meghatározni. Ez a művelet egyetlen valós számot fog előállítani minden  $Y$  kimeneten, ebből adódik a művelet elnevezése: defuzzifikáció. Az egyik legjobb tulajdonságokkal rendelkező, emiatt az egyik legelterjedtebb defuzzifikációs technika a súlyközpont (COG center of gravity) módszere, amit súlyozott integrálás eredményeként kapunk. Amennyiben semmilyen megkötéssel nem élünk a kimeneteken használható tagsági függvényeknél, úgy ezt a műveletet csak numerikus integrállal közelítve számíthatjuk, sőt általános esetben még az implikáció és aggregáció műveleteket is numerikus közelítéssel kell implementálni. Emiatt ezek a lépések számításilag intenzívek, ráadásul csak közelítő megoldást adnak.

Dombi József elméletén alapuló fuzzy aritmetikán, ahol a műveleteket a függvények inverzén végezzük el, lehetőség van számításilag hatékony módon megoldani a teljes Mamdani szabályozást. Amennyiben háromszög vagy trapéz jellegű tagsági függvényeket alkalmazunk, úgy a bemutatott ABC (arithmetic based control), míg szigmoid jellegű tagsági függvények esetében Pliant szabályozót kapunk.

Mindkét módszer egyszerű aritmetikai műveleteken alapul implikáció helyett. A hozzárendelési műveletekhez jól illeszkedő két új, hatékonyan számítható defuzzifikációs eljárással a teljes Mamdani típusú fuzzy szabályozás gyors és pontos eljárássá változtatható. Az így kapott szabályozók a klasszikus megvalósításhoz képest jelentős javulást mutatnak pontosság és sebesség terén, valamint működésüket nem korlátozza a paraméterek tartománya, és a kimeneten intuitíven kezelik a különböző fuzziási szintű tagsági függvényeket.

Az egyik nagy előnye az ABC, valamint Pliant szabályozók használatának a tartományfüggetlenségből adódik. A klasszikus implementációknál a kimeneti tartománynak jelentős szerepe van a számításban, ami gyakran vezet tervezési hibához, amennyiben valamely kimeneti tagsági függvény középpontja a tartomány határára kerül. Ez a hiba fel sem merülhet az aritmetikai alapú fuzzy szabályozóknál.

Különböző fuzziáság mértékű tagsági függvények esetében a klasszikus COG módszere a kimeneten a nagyobb fuzziáságú tagsági függvényt favorizálva, annak középpontja felé tolja el a számított kimenetet. Ezzel szemben az aritmetika alapú defuzzifikációs eljárások intuitíven kezelik ilyen esetekben is a kimenetet.

Míg a COG módszernél numerikus integrálásra van szükség a számítás során, addig az ABC és Pliant szabályozóknál nincs ilyenre szükség. Ezzel magyarázható a jelentős sebesség és pontosságbeli eltérés a módszerek között. Összehasonlításuk során közepes numerikus felbontás ( $n = 1001$ ) esetén mintegy 190-szeres, nagy numerikus felbontás ( $n = 10001$ ) esetén akár 2400-szoros gyorsulást tapasztalhatunk.

Genetikus algoritmussal sikeresen lehet az aritmetika alapú fuzzy szabályozókat feladatspecifikusan optimalizálni. Segítségével a szabályok, illetve a tagsági függvények paraméterei lesznek átalakítva. Az így optimalizált Pliant szabályozóval a MATLAB víztartály demó szabályozását sikerült jelentősen feljavítani a demóban megadott 5 szabályt optimalizálva. Azonban a MATLAB inverz inga demójában definiált 16 elemű szabálybázis helyett csupán 2, jól optimalizált szabállyal is lehetséges alacsonyabb hibát elérni úgy, hogy a kifejtett erők maximuma és integrálja sem nagyobb a referenciánál.

## **5. A tézisek új eredményeinek összefoglalása**

### **5.1. Tézis 1. Átviteli függvény optimalizálása és új erő-nyomaték áttétel kidolgozása (PAM) aktuátorokhoz**

Egy új, 6 paramétert tartalmazó átviteli függvényt fejlesztettem ki, amely alkalmas PAM aktuátorok statikus karakterisztikájának leírására. Ez az összefüggés a PAM által létrehozott erőt fejezi ki az összehúzódás és az alkalmazott nyomás függvényében. Más modellekkel összehasonlítva, az új függvény kompaktsága és pontossága is tovább javult.

Ez az új átviteli függvény különösen a PAM-ek normál működési tartományán belül hasznosítható a gyakorlatban, amit a kiemelkedő pontossága tesz lehetővé. Továbbá más modellekhez képest a kevesebb paraméter használata gyorsabb és megbízhatóbb modell illesztést tesz lehetővé. A függvényt úgy alkottam meg, hogy kifejezhető legyen az inverze, ami azt a nyomás értéket adja meg, amely egy adott kontrakció fenntartásához szükséges adott erőkifejtés mellett. Ez a tulajdonság különösen a nyílt hurkú alkalmazásoknál jól alkalmazható.

Továbbá egy újrakalibrációs módszert is megadtam, amely a modell nagy pontossággal való újraillesztését teszi lehetővé alacsony mérési pont felhasználása mellett is, amely más megközelítéseknél a teljes tartományban jelentős számú mérési pontot igényelne. Továbbá a nemlineáris karakterisztikát mutató áttételek vizsgálatára és optimalizálására egy szimulációs keretrendszert fejlesztettem ki. Ennek segítségével egy nem koncentrikus alakú áttételt terveztem, amely jelentősen javítja az antagonisztikus elrendezésű PAM aktuátorok erő-nyomaték átvitelét.

Valamint egy kísérletes eszközt is készítettem, amelyhez legyártottam egy optimalizált csiga formájú áttételt is. Segítségével az erő-nyomaték karakterisztikát feljavító szimulációs eredményeket sikerült a gyakorlatban is visszaigazolni az áttételi arányok mérésével, ami magas korrelációt mutatott a szimulációval.

## **5.2. Tézis 2. Trajektória követés optimalizálása a "pure pursuit" trajektória követő eljárással**

A kerekeken guruló mobil robotok trajektória követésére egy új eljárást fejlesztettem ki, amelyben a "pure pursuit" útvonalkövető módszert időfüggő, így folyamatosan frissülő előretekintési távolság funkcióval láttam el. Az új eljárásomnak, a lineáris és nemlineáris állapotkövető módszereknél jól ismert tuningoló és csillapító paraméterek használata nincs szüksége. A "pure pursuit" trajektória követő eljárásnak csak egyetlen, alkalmazás és eszköz független paraméterre van szüksége.

Az általam kifejlesztett modellt az általánosan használt lineáris és nemlineáris állapot követő módszerekkel hasonlítottam össze. Eredményül azt kaptam, hogy az új modell a gyakorlatban megbízható szabályozás mellett jelentősen javítja a követési hibákat két állapotkövető szabályozóhoz képest.

## **5.3. Tézis 3. Új fuzzy aritmetika alapú szabályozók implementálása, alkalmazása és kiértékelése**

Dombi József fuzzy aritmetikai elméletén alapuló fuzzy szabályozókat fejlesztettem ki, melyek a gyakorlatban is jól alkalmazhatók MATLAB szimulációkban.

Elsőként implementáltam keretrendszereket a Pliant és ABC fuzzy szabályozókhoz MATLAB környezetben, melyekkel tipikus fuzzy demó szabályozásokat oldottam meg. A szimulációs eredményeket a klasszikus fuzzy szabályozásokkal összevetve jelentős javulást mutattam ki.

Kimutattam, hogy a saját keretrendszerben futtatott szabályozók mind sebességben, mind pedig pontosságban jobb eredményeket adnak a klasszikus fuzzy szabályozáshoz képest. Kimutattam a tartományfüggetlenségüket, és a különböző fuzzi-ságú tagsági függvények intuitív kezelési képességüket, melyek a gyakorlati alkalmazásban nyújtanak előnyt.

Sikerrel alkalmaztam genetikus algoritmust, amivel az új keretrendszerbe implementált fuzzy szabályozások szabályozó képességét javítottam fel.

## 6. Téziseket alátámasztó publikációk

A szerző tézisekben felsorolt munkásságát alátámasztó publikációk táblázata (1).

1. táblázat. Téziscsoportokat alátámasztó hivatkozások

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
I.	•	•			
II.			•		
III.				•	•

## Hivatkozások

- [1] **T. Szepe.** Accurate force function approximation for pneumatic artificial muscles. *Logistics and Industrial Informatics (LINDI). 3rd IEEE International Symposium on IEEE, Budapest, Hungary, 2011.*
- [2] **Tamás Szépe.** Optimizing torque characteristic of antagonistic PAM actuators with a nonlinear torque transmission. *Advanced Robotics - publication under review.*

- [3] **Tamas Szepe**; Samy F.M. Assal. Pure Pursuit Trajectory Tracking Approach: Comparison and Experimental Validation. *International Journal of Robotics and Automation, Acta Press*, Vol. 27(4), pp. 355–363, 2012.
- [4] József Dombi, **Tamás Szépe**. Pliant control system: implementation. *Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 8, 2010.
- [5] József Dombi, **Tamás Szépe**. Fuzzy Control Revisited. *PLOS ONE - publication under review*.

## **Tézisekhez kapcsolódó további publikációk**

- [6] **Tamás Szépe**, József Sárosi. Matlab Models for Pneumatic Artificial Muscles. *Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics*, pp. 65–70, 2009.
- [7] **Tamás Szépe**. Sensor Based Control of an Autonomous Wheeled Mobile Robot. *Proceedings from PROSENSE Seminar Presentations, Ljubljana*, 2009.
- [8] **Szepe, T.**, and J. Sarosi. Model based open looped position control of PAM actuator. *Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 8, 2010.
- [9] Sárosi J., **Szépe T.**, Gyeviki J. Approximation Algorithm for the Force of Pneumatic Artificial Muscles. *Proceedings of Factory Automation, Kecskemét, Hungary*, pp. 101–104, 2010.
- [10] Sárosi J., **Szépe T.**, Gyeviki J. Function Approximation for the Force Generated by Different Fluid Muscles. *Analecta Technica Szegedinensia, Review of Faculty of Engineering*, 1, pp. 75–80, 2010.
- [11] Sárosi J., **Szépe T.**, Gyeviki J. New Mathematical Model for Pneumatic Artificial Muscles. *Hungarian Agricultural Engineering*, 22, pp. 49–52, 2010.



- [12] Sárosi J., **Szépe T.**, Gyevikí J., Szabó G., Szendrő P. Mathematical Model for Fluid Muscles. *11th International Carpathian Control Conference, Eger, Hungary*, pp. 87–90, 2010.

## **Egyéb hivatkozások**

- [13] Roberts, Adam. The History of Science Fiction. *Palgrave Histories of Literature, Palgrave Macmillan, New York*, pp. 168, 2006.
- [14] Poole, Harry H. Types of Robots. *Fundamentals of Robotics Engineering, Springer Netherlands*, pp. 27–51, 1989.
- [15] All On Robots website. <http://www.allonrobots.com/types-of-robots.html>
- [16] A. Kapelevich High Gear Ratio Epicyclic Drives Analysis. *Gear Technology*, pp. 61–67, 2014.
- [17] J.W. Sensinger, J.H. Lipsey. Cycloid vs. harmonic drives for use in high ratio, single stage robotic transmissions. *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota, USA*, 2012.
- [18] N. Schmit, O. Masafumi. Design and realization of a non-circular cable spool to synthesize a nonlinear rotational spring. *Advanced Robotics*, Vol. 26, pp. 234–251, 2012.