

Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés
tézisfüzete



Járó robotok hajtásszabályozás-optimalizálása dinamikai
szimulációs modell segítségével

Kecskés István

Témavezető:
Dr. Odry Péter főiskolai tanár

Alkalmazott Informatikai Doktori Iskola

Budapest, 2018.

Tartalom

Tartalom.....	1
1. A kutatás előzményei.....	2
2. Célkitűzések.....	5
3. Vizsgálati módszerek.....	6
4. Új tudományos eredmények.....	8
<i>Szabad(ka)-II robot szimulációs modellezése és modellvalidáció.....</i>	<i>8</i>
1. tézis.....	8
2. tézis.....	10
<i>Optimalizációs módszer kiválasztása.....</i>	<i>11</i>
3. tézis.....	11
<i>Robot hajtásminőségének meghatározása.....</i>	<i>12</i>
4. tézis.....	13
<i>Fuzzy-PI motor szabályzó fejlesztése és paramétereinek optimalizálása.....</i>	<i>14</i>
5. tézis.....	14
5. Az eredmények hasznosítási lehetősége.....	16
6. Irodalmi hivatkozások listája.....	17
7. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények.....	19
8. További tudományos közlemények.....	20
Absztrakt.....	21
Abstract.....	21

1. A kutatás előzményei

Számos egyetem, kutatóközpont és cég kutat és fejleszt járó robotokat az 1970-es évek óta, habár a legtöbbjük laboratóriumi prototípus. Általánosságban elmondható, hogy a járó robotoknak számos hiányossága van, ezért még nem terjedt el széles körű használatuk az iparban: lassúak és nem energiahatékonyan mozognak, ami pedig fontos lenne egy mobil robot esetében [De Santos, 2007].

Az energiahatékony járórobot-fejlesztés elsősorban az energiahatékony motorhajtás és a robot optimális szerkezetére fókuszál. Különböző energiahatékony hozzáállásokat vizsgáltak több lábú robotokra, ahol az elhasznált elektromos energia minimalizálását kutatták a járás szerkezeti paramétereinek optimalizálásával [De Santos, 2009].

A járó robotok fejlesztéséhez és energiahatékony optimalizálási folyamataihoz fontos a komplett dinamikai modell. Dinamikai stabilitást kerestek különböző láb- és járásmódzatokkal négy lábú járó roboton [Lin, Ben Sheng, 2001], neurális hálózattal szabályozott járó robot járását optimalizálták szimulációs modellel [Von Twickel, 2012], vagy például hat lábú aktuátorainak méretét határozták meg dinamikai modell segítségével [Carbone and Ceccarelli, 2008].

A hat lábú járó robotok fuzzy szabályozása elterjedt megoldás, amelyet már húsz éve fejlesztenek. Például [Pratihari, Dilip Kumar, 2000] genetikus algoritmustal optimalizált egy fuzzy-alapú járásszabályozót. Hat lábú robotok mellett – mint amelyen [Sakr, Ziad, 2007] – mászó robotoknál is alkalmaznak fuzzy szabályozókat [Wang et al., 2009]. Robusztus szabályozási követelményeknek is eleget tudnak tenni a fuzzy megoldások [Kazuo Tanaka, 1996].

Viszont a négy, hat és nyolclábú járó robotok járásminőségének általános meghatározásával nem foglalkoztak részletesen. A két fő szempont, az energiahatékony és a sebesség melletti egyéb szempontok csak szeparáltan vannak kutatva, mint a rázkódás és az önvédelmi mechanizmusok. A különböző minőségi szempontok közötti preferenciák és Pareto megoldáshalmazok vizsgálata még egy jövőbeli kihívás a járórobot-kutatásban. Ez a disszertáció ennek nyomán indult el, és a legfőbb új tudományos eredmény többek között a járásminőség megfogalmazására és annak minősítésére vonatkozik.

A **Szabad(ka)-II** hat lábú robot, lábanként három szabadságfokos beágyazott mechatronikai rendszer, alkalmas összetett hajtásszabályozási feladatok kutatására. A számítógépes modell segítségével jól lehet becsülni a robot viselkedését különböző alkalmazásokban, akár extrém esetekben is. A modellt alkalmazva fejleszteni lehet energiahatékony, akkumulátorkímélő, rázkódásmentes járást biztosító hajtásszabályozásokat. Extrém esetekben is kiértékelhető a robot viselkedése, ami azért fontos, mert a szerkezeti sérülés elleni védelmet is a motorszabályozás feladatkörébe soroltam.

A következő kutatási irányokat, lehetőségeket vettem figyelembe a kutatás megkezdése előtt:

- a) A robot dinamikai **szimulációs modellezése** és annak validációja a valós roboton mért mennyiségekkel. A teljes dinamikai modell magában foglalja a robot 18 szabadságfokának kinematikáját és dinamikáját, az elektronikai meghajtás, a DC motorok modelljét és a talajszimulációt is. A Szabad(ka)-II robot szenzorai lehetővé teszik a csukók szögeinek, a motor áramának és feszültségének mérését, továbbá a test 3D gyorsulás- és elforduláskövetését. A szimulációs modellezés általános használatát a hexapod robotok tervezésében [Tedeschi and Carbone, 2014] foglalták össze. Hét másik hexapod robot szimulációs modelljét vizsgáltam és hasonlítottam össze, főleg a

- célkitűzések és a validáció szempontból: LAVA [Zielinska and Heng, 2002], Genghis II [Porta and Celaya, 2004], BILL-Ant-p [Lewinger et al. 2005], ATHLETE [Hauser et al. 2006], COMET-IV [Ohroku and Nonami, 2008], Lynx.BH3-R [Currie et al. 2010].
- b) A **járásminőség** meghatározása és annak mérése a szimulációban és a valós roboton is. A járásminőség meghatározása több fogalmat is felölel, ilyen például a minimális elektromos teljesítményfelvétel maximális járási sebesség mellett, a minimális parazita translációs és rotációs gyorsulások minimalizálása a berendezés élettartamának növelése érdekében stb. A különböző célok közötti dominancia kiemelkedően érdekes kutatási terület. Járó robotokra nem találtam erre vonatkozó olyan kutatást, amelyet alkalmazni lehet általánosságban, akár a Szabadka robotokra.
- c) **Fuzzy szabályzás** alkalmazása a Szabad(ka)-II beágyazott mechatronikai rendszer esetében. A szabályzó minél egyszerűbb struktúrája és annak beágyazási lehetősége kis mikrovezérlőkbe szintén a kutatás tárgyát képezi. A fuzzy szabályzás előnyeit a PID szabályzáshoz tudjuk hasonlítani. Fuzzy és fuzzy-PID hibrid szabályzókat ipari alkalmazásban egyre elterjedtebben alkalmaznak, leginkább a 2000-es évek óta [Precup, Radu-Emil, 2011]. Számos kutatást lehet találni robot fuzzy szabályzására, ezek főleg kerekes mobil robotok és álló manipulátor robotok. Járó robotok esetén már kevesebb a fuzzy alapú szabályzás, például [Sakr, Ziad, 2007] [Malki, Heidar A., et al, 1997]. Viszont nincs megfelelő kutatási eredmény olyan járó robot fuzzy-szabályzó fejlesztéssel kapcsolatban, amely többféle optimalizált szabályzóhoz van hasonlítva,.
- d) **Optimalizációs** módszerek és intelligens kereső algoritmusok alkalmazása a hajtásszabályzás minőségének maximalizálására (egycélú vagy többcélú), ugyanakkor a számítási igény minimalizálása. A megfelelő, vagyis leghatékonyabb optimalizáció-módszerek kiválasztása is fontos, hiszen előreláthatóan korszerű számítógépen is több napig tartó számításigény jelenik meg. Az egyik legelterjedtebb módszer a részecskeraj-optimalizáció, például ilyen módszerrel effektíven tudtak fejleszteni dinamikus járási programot hatlábú robotnak [Juang et al. 2011]. Genetikus algoritmust is alkalmaztak többen, például kétlábú robot járásoptimalizálásához [Arakawa, Takemasa, 1996].
- e) A **robosztus** optimum meghatározása és megkeresése kiemelkedően fontos lehet ilyen nagy bizonytalansággal rendelkező rendszer esetén. Hatlábú mászó robot meghajtása esetén fontos a robosztus és stabil szabályzás [Haynes et al, 2012].
- f) Egy minimális **szenzorfelület** meghatározása, amelyik az eszközt ki tudja szolgálni, és biztosítja a szerkezetnek működése közben a megfelelő feltételeket. A kérdés, hogy milyen szenzorfelület elegendő a gyorsan reagáló motorszabályzáshoz. Érdekes megvizsgálni további szenzorok beépítését, amelyek elsődlegesen nem a motor szabályzásához vannak kapcsolva, hanem például a csuklóknál lévő fogaskerekekben jelentkező holtjátékok (potenciométer), a talpak járás közbeni megcsúszása (gyorsulásmérő a lábon), változó súrlódási erők (nyomatékmérők), robottest forgása és rezgései navigációs szenzorokkal (giroszkóp, gyorsulásmérő a testen) stb.
- g) A **hajtásszabályzás** a terv szerint a motorszabályzásra és a láb pályagörbe kiszámítására terjed ki előre meghatározott scénáriókra. A robotot alacsony rendszerszinten (beágyazott rendszer) kutatjuk, ahol gyors beavatkozásokat tudunk elérni a DC motorokkal. A kutatás előzményeinek egyik fő kérdése az volt, hogy milyen mértékben lehet ezen az alacsony szinten védő mechanizmust kialakítani, viszonyítva a magasabb szabályzási szintek lehetőségeihez képest, vagy azok helyett. Nem találtam olyan járórobot-szabályzási irodalmat, amelyben ilyen típusú követelményeket és

szabályokat kutattak volna. A lágy-robotika¹ inkább a robot szerkezeti építő elemek és aktuátorok kutatására fókuszálnak a lágy-szabályzás helyett.

A tervezett kutatás aktualitását a tudományos szintéren fellelhető hiányosságok bizonyítják a járó robotokra és a robotmodellezésre vonatkozóan:

- Általános járó robotokra vagy hatlábú járó robotokra általános hajtásminőségi meghatározás még nyitott kérdés.
- Nem találtam a Szabad(ka) robotokra alkalmazható információkat a multiszenáriós szimulációról, annak értelmezéséről és optimalizálásáról, továbbá a szenárió paraméterekkel szembeni robusztusságnöveléséről.
- Az irodalom bemutatja számos egyéni fuzzy szabályzó optimalizálását, de a Matlabban lévő Fuzzy Toolboxszal létrehozott szabályzóról nem találtam megfelelő megoldást.
- Olyan robusztus optimumot keresek a szimulációs modellen, amely a beágyazás után is az elvárt eredményt adja. Ez a téma nincs eléggé kiemelve a robotos publikációkban, sok helyen a modellvalidáció is csak szubjektív véleményezés.
- A motoráram visszacsatolása a DC motorszabályzásba nem tradicionális megoldás. Ennek szükségessége és lehetőségei robotlábak esetén nincs széleskörűen kikutatva. Kutatás folyamán fuzzy szabályzóval megvalósítható megoldásokra fókuszáltam.

A következő eszközökáltak rendelkezésre, amelyeket felhasználtam a kutatás során:

- „Robotics toolbox”, a dinamika és kinematika modellezéséhez [Corke I., 2001]
- Heurisztikus optimalizációs módszerek alkalmazhatósága robotszimulációs környezetben [Erdogmus, Pakize, 2012]
- Optimalizációs módszerek versenyztetésének értelme és módja [Luis Miguel Rios, 2013]
- PSO algoritmus Matlab implementációja² [SM Mikki, 2008]
- Az optimum robusztussági index kiszámítása (ezt módosítottam) [Augusto, 2012]
- Matlabban lévő Fuzzy Toolbox [Sivanandam, S. N, 2007]
- Fuzzy-PI motorszabályzó szerkezet és használata [Radu-Emil Precup, 2013], [Asija, Divya, 2010], [Tiwary, Neha, 2014]

¹ Soft-robotics.

² PSO source code available: <https://code.google.com/archive/p/psomatlab/>

2. Célkitűzések

Céлом egy effektív fuzzy szabályzón alapuló motorszabályozási eljárás kifejlesztése, amely kifejezetten nemlineáris dinamikával és erős paraméter-bizonytalansággal rendelkező rendszerek irányítására alkalmas. A kutatás folyamán olyan mechatronikai eszközökre van szükség, amelyeken az általam végzett elméleti eljárásokat beágyazhatom, tesztelhetem és érvényesíthetem (validálhatom). Erre alkalmas a Szabad(ka)-II robot³.

Az általam preferált vezérlési módszer központi eleme fuzzy logikai szabályzókon alapul. A fuzzy rendszerek előnyökkel rendelkeznek a klasszikus, általánosan elterjedt PID szabályozókkal szemben [6] [9] [10]. A fuzzy szabályzóknak megvan a lehetősége, hogy robusztus szempontból is megfeleljenek, azaz extrém vagy szélsőséges működési körülmények között is jobb eredményeket produkálhatnak [1]. A fuzzy szabályzó előnyös lehet más komplex szabályozókhoz képest, a vezérlő erőforrási kapacitását tekintve [16]. A fuzzy szabályozás előnyei összetett, több szabadságfokú szerkezetek (robotok, azon belül a járó robotok) irányításának esetében nyilvánulnak meg, hiszen nehézkes a modellalapú szabályzókat levezetni ilyen robotokra.

Kitűzött kutatási feladatok:

- a) Megépíteni a robot/manipulátor teljes mechatronikai szimulációs modelljét. Elektronikai és dinamikai szempontból élethű modell, vagyis a beágyazott elektromos vezérlés az elektromos motorok, a robottest és a talaj dinamikája mind a modell részét képezi. Élethű, vagyis a mérési hibákhoz viszonyítva kielégítő pontosságú. Ehhez össze kell vetni a roboton/manipulátoron mért és a szimulációs modell által generált eredményeket, majd értelmezni az eltéréseket. Amennyiben valamelyik változó az elvárt toleranciához képest jobban eltér, akkor keresni kell az okokat és magyarázatokat.
- b) Keresni kell azt a megfelelő, de olcsón megvalósítható szenzorfelületet, amely a robot járásához és hajtásszabályozásához szükséges. Háromdimenziós digitális gyorsulásmérő és giroszkóp a robottestre szerelve jól hasznosítható a modellvalidációban és a járás követésében is. A szögsebességmérő enkóderek mellett minden meghajtó motor árama is mérhető, amely a fuzzy szabályzó egyik fontos bemenete lehet. A tápfeszültség mérése pedig szintén a modell validálásánál bizonyul hasznosnak. A csuklóra szerelt potenciométer a holtjáték igazolásában használható.
- c) Meg kell határozni azokat a hajtásminőség-mérő függvényeket (célfüggvények), amelyek segítségével elérhető a kívánt viselkedés, és számszerűsíthető a robot járásminősége. Hosszabb távú kutatási irány a célfüggvények közötti dominancia meghatározása úgy, hogy a minőségmérés megfelelő legyen a robot különböző alkalmazásai tekintetében. Ez feltételezi, hogy a keresett haszon függvény⁴, amely a dominancia⁵ alapján skalarizálja a többcélú minőséget (példák [9] [11] [16]), és a hajtás optimuma kellően robusztus legyen.
- d) Meg kell határozni azokat a járási módokat vagy feladatokat (scenáriók), amelyeken a minőségmérést célszerű elvégezni, figyelembe véve a célokat és a robot képességeit. Olyan scenáriókat kell választani, ami mind a szimulációban, mind a valóságban kivitelezhető az adott laboratóriumi körülmények között.

³ <http://www.szabadka-robot.com>

⁴ Utility function.

⁵ Preference.

- e) Keresni kell a kiválasztott minőségmérési függvények szerinti legjobb minőséget produkáló hajtásszabályzást, amely magába foglalja a láb pályagörbe és a fuzzy-alapú szabályzó paramétereit. Az optimalizációt a szimulációs modellen célszerű futtatni, egyszerre az összes meghatározott scenárióval.
- f) El kell végezni a kapott optimális hajtás validációját. Ehhez az optimális szabályzót és pályagörbét be kell ágyazni a robotba, és azon el kell végezni a méréseket.

3. Vizsgálati módszerek

Szabad(ka)-II robot

A kutatásom kezdetén, 2012-ben a Szabad(ka)-II robot már meg volt építve. Csak a beágyazott szoftvereket kellett kibővíteni, hogy a robot és a szimulációs modell ugyanazokat a hajtásszabályzási feltételeket biztosítsa. A robot központi vezérlő és lábvezérlő mikroprocesszorai beágyazott C nyelven vannak programozva.

A roboton lévő mérőegység 500 Hz vagy 333 Hz mintavételezéssel tárolja és küldi a mérési adatokat. A mérés mintavételezése megegyezik a motorszabályzó frekvenciájával. A robot mérőegysége a következő változókat és szenzoradatokat biztosítja:

Mérés	Lokáció	Szenzitivitás	Precizitás	Megjegyzés
DC motor árama	18 motor	0.163 mA/lb	12 bit ADC	abszolút érték
Csukló szögek	18 csukló	9.6 e-5 rad/lb 5.5 mdeg/lb		motor oldalra van szerelve
PWM motor vezérlő feszültség	18 motor	11.7 mV/lb	10 bit	NYÁK-ra szerelve
Tápfeszültség	6 lábra	4.6 mV/lb	12 bit ADC	NYÁK-ra szerelve
3D Giroszkóp	Robottest	17.5 mdeg/s	16 bites	L3GD20 3-axis digital gyroscope (32F429DISCOVERY része)
3D Gyorsulásmérő	Robottest	2 g/msb	16 bites	Adafruit LIS3DH Triple-Axis Accelerometer

Szimuláció modell

A valós rendszerekben történő szabályozás tervezése, tesztelése és kiértékelése nehezebb feladat, mint amikor egy PC applikációban történik a szabályzás. Legtöbb esetben az autentikus környezetben történő vizsgálat felettébb költséges, lassú, valamint a szélsőséges körülmények megvalósítása gyakran lehetetlen, és a berendezés számára akár káros is lehet. Az eredmények gyorsabb elérésének érdekében szükséges a fizikai rendszer valósághoz közeli, minél jobb matematikai leírása. A Szabad(ka)-II robot fejlesztésében egy ilyen dinamikus modellt fejlesztettem és alkalmaztam.

A létrehozott szoftverek jelentős részét MathWorks Matlab környezetben fejlesztettem. A szimulációs modell fő részeit Simulinkben építettem meg. A kinematikai és dinamikai modellezéshez a P. Corke által fejlesztett Robotics Toolbox 7.1 verzió [I. P. Corke, 2001] szolgált mint keretrendszer. A modell magába foglalja a test és a lábak 3D mozgását és dinamikáját, a motorok és áttételek elektromechanikai modelljét, a talajkontaktust, a szenzorok modelljét és a beágyazott digitális szabályzó rendszer modelljét [3], [7]. A modell bemenetei a

láb pályagörbék, amelyeket a valós robot esetében egy vezérlő PC küld le a robot belső vezérlő szoftverének.

Validálás

A modell validálását kétszer végeztem el, először a hajtásszabályozás fejlesztése-optimalizálása előtt, majd azután egy kiválasztott optimális szabályzással. Az elsőre azért volt szükség, hogy egy valóság-hű modellen keressem az optimális szabályzást. A másodikra pedig azért, hogy igazolni tudjam, valóban megvalósítottam-e a kitűzött célokat.

Meghatároztam a rendszer minden kulcspontjának a pontosságát, illetve várható hibahatárát, majd ezek alapján meghatároztam a toleranciákat a validálási eredmények klasszifikációjához. A motor árama nagyobb eltérést mutatott, ezért külön foglalkoztam ezzel a kérdéskörrel [7].

Optimalizálás

Tapasztalatom szerint akár több hónap is szükséges az optimalizálási eredmények kiszámításához, mivel komplex és időigényes szimulációs feladatokat kell futtatni (egy öt másodperces szimuláció kb. tíz percig tart.). Ezért kerestem olyan optimalizálási algoritmusokat, amelyek a legkevesebb függvényhívással képesek rátalálni az optimumra. Heurisztikus módszereket versenyeztettem gyors tesztfüggvényeken, amelyekbe hasonló tulajdonságokat építettem be, mint a robotszimuláció (például sokváltozós, nem folytonos stb.). Végül részecske-raj módszert (PSO) választottam az eredmények alapján, annak egy Matlabos implementációját [6]. Ezt párhuzamosítottam, hiszen a legtöbb mai processzor már négy vagy hat maggal rendelkezik. Elértem, hogy egy átlagos optimalizáció hat szimulációs scénárióval csak öt napig fut.

Fuzzy szabályzó optimalizálása

Egy fuzzy szabályzó paramétereinek száma függ az összes tagsági függvények és szabályok számától. Ennek racionalizálásához a következő szempontokat állítottam fel:

- Feltételezzük, hogy a meghatározott szabályok megfelelőek, azoknak csak a súlyai változók.
- Továbbá a szimmetrikus tagsági függvényeknek és szabályoknak nem számoltam külön értéket.
- Úgy csökkenthetők a tagsági függvények paramétereit, hogy csak a bemenet-kimeneti határértékeket vettem változóknak, a bennük lévő tagsági függvények egymáshoz képest nem változnak.
- A tagsági függvények típusai egyformán változtathatók, tehát bemenet, kimenet lehet különböző, de minden kimeneti függvény egyforma típusú. Csak azok a típusok vehetők be a lehetőségek közé, amelyek egymásra átkonvertálhatók.

Például ha egy szabályzónak összesen negyven paramétere van, akkor ezen egyszerűsítésekkel csak tizenkettő változót kapunk, amellyel minden lényeges változó le van fedve.

4. Új tudományos eredmények

Szabad(ka)-II robot szimulációs modellezése és modellvalidáció

A szimulációs modell verifikálása és validálása elengedhetetlen ahhoz, hogy megbizonyosodjunk, a szimuláció ekvivalens eredményeket produkál-e. A verifikációs eljárás alatt felmérjük, hogy a szimuláció elemei megfelelnek-e a tervezett rendszernek, ami a valós rendszeren alapszik. Ennek eredménye általában nem kielégítő, hiszen nemcsak a modell elemeinek, hanem a szimulációs eredményeknek is meg kell felelniük a valóságnak. Ezért kell a modell validálását is elvégezni, ami nem más, mint a szimulációs eredmények illesztése a fizikai rendszeren mért valós eredményekhez. A prototípus robot és a dinamikai szimulációs modell ciklikus összehangolása javasolt a mérőrendszer, a scenáriók és a modell közelítése végett. Ezt a folyamatot addig folytattam, amíg a modell a lehető legjobb leírását nem adta a valós rendszernek.

A Szabad(ka)-II robot modelljében a közelítő megoldások ismeretlen paramétereit és az esetleges mérhetetlen valós paramétereket optimalizációs eljárással becsültem, ahol a cél a szimulációs és a valós mérések közötti különbség minimalizálása volt. Heurisztikus optimalizálási eljárásokat versenyeztettem, hogy megtaláljam azt a módszert, amely a leghatékonyabban meg tudja találni egy ilyen rendszer optimumát: sokdimenziós, nem lineáris, egész számú változók jelenléte is⁶.

A digitális vezérlőegység a mobil robotok szerves része, amelyet a szimulációs modellbe is be kell építeni a teljes modellezés érdekében. Ha a vezérlés vagy szabályzás a szimulációs modellben van fejlesztve, akkor ennek szoftverszemponitú felépítését úgy kell kialakítani, hogy hatékony módon lehessen átültetni a szabályzó algoritmust a valós eszközbe. Biztosítani kell, hogy a valós idejű beágyazott rendszereknél és a szimulációban is ugyanazok a mintavételezési frekvenciák legyenek. A beágyazott rendszerek belső órajeleinek pontosságát ellenőrizni érdemes, mert azok eltérhetnek a névleges értéktől [11]. A szabályozás kidolgozása során figyelembe kell venni a rendszerben jelenlévő szenzorok (pl. 16 bites gyorsulásérzékelő), illetve gerjesztő jelek felbontását (pl. 8 bites PWM). [16]

1. tézis

Járó robot dinamikus modell validálásának alapfeltételei:

- a) **Meg kell határozni a validált modell felhasználási célját, és ennek értelmében kell a precizitási szempontokat és a mérési változókat meghatározni. [7]**
- b) **A dinamikai modell várható maximális precizitását fel kell becsülni. A modell hibája nem lehet a mérőrendszer hibájától kisebb, ezért elsősorban ezt kell megbecsülni, megismételt mérésekkel és szórás vagy konfidencia intervallum számítással. [7]**
- c) **Ugyanaz a szabályzó algoritmus vagy vezérlő program kell hogy fusson a szimulációs modellben és a valós robotban beágyazva is [11].**
- d) **A modell működéséhez a mérhető paramétereket le kell mérni⁷, a többi modellillesztési optimalizációval érdemes megbecsülni [7]. Célszerű heurisztikus optimalizáció módszerekkel keresni a illesztés globális optimumát, hiszen a járó**

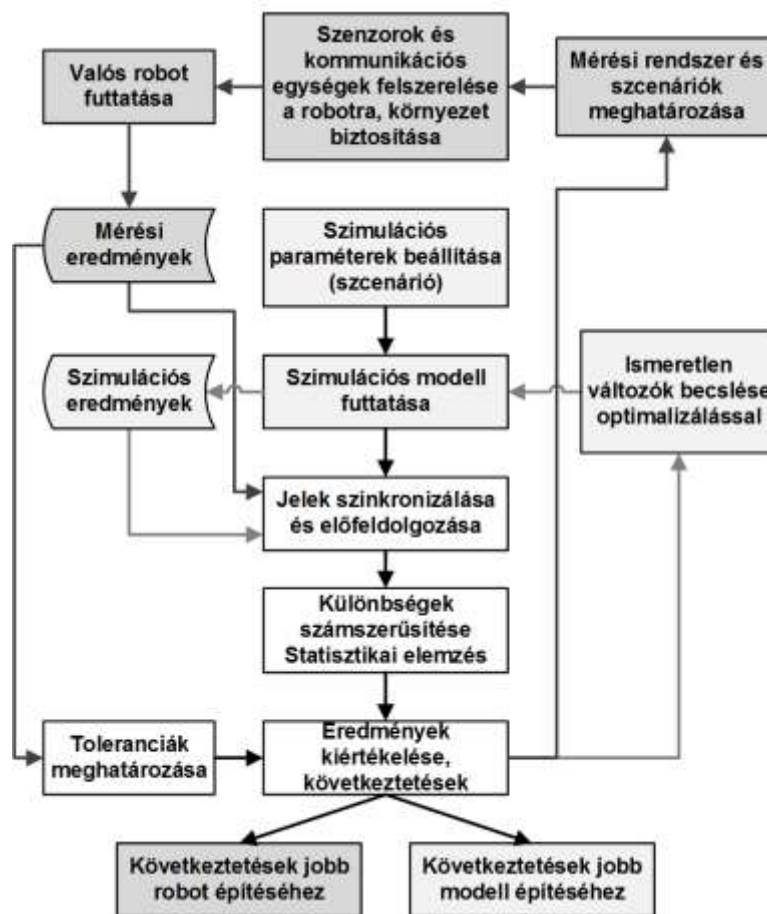
⁶ Mixed-Integer Programming Problem – ahol az optimalizálandó változók között van legalább egy olyan, amelyre egészszámú korlátozás van.

⁷ Az adott laboratórium képességeihez képest.

robotok viselkedése nemlineáris, nem folytonos (elsősorban a talajkontaktus miatt), ezért nem deriválható, és sok az ismeretlen [6]⁸.

- e) A méréseket a robot járása vagy mozgása közben a robotra szerelt mérőegységekkel el kell végezni. A mérési jeleket először szinkronizálni kell a szimulációs eredményekkel, majd a különbséget számszerűsíteni kell a meghatározott toleranciák mértékegységével összhangban.
- f) Ha a toleranciaértéktől valamely változó nagyobb eltérést mutat, akkor meg kell találni a különbség okát, és lehetőség szerint korrigálni. A modell általában csak közelítő, ezért várhatóan a modell tökéletlensége a fő ok, de lehetséges az is, hogy analóg vagy digitális hiba van a mérési folyamatban. Ezért fel kell tárni a hibák forrását. A rendszer többciklusú javítása is a validáció feladatkörébe tartozik.

1. tézis folyamatábra:



Szabad(ka)-II esetében: Az optimális járást tűztem ki célul, ezért a járás mozgásának és a csuklók szabályzásának paramétereit validáltam. Következő változókat validáltam: csuklósögeket, a szabályzó feszültségeket, a motoráramokat, a tápfeszültségeket és a robottest gyorsulását. A szimuláció a mérésekhez képest 1-5% toleranciát mutat a csuklósögek és feszültségek esetén, míg a motoráram és a gyorsulásmérő ennél nagyobb, 25% relatív eltérést

⁸ A legegyszerűbb talajkontaktust egy egydimenziós rugó-csillapítóval lehet közelíteni, amelynek két ismeretlenje van [4]. Több láb esetében és más ismeretlen paraméterek mellett már sok ismeretlenről és nagy keresési térről van szó.

is mutat helyenként. A Szabad(ka)-II robotra alkalmazott statisztikai mérőfüggvényeként a relatív átlagos abszolút hiba függvényt, az RMAE⁹-t alkalmazom.

A Szabad(ka)-II robotnál keresőtábla alapú fuzzy implementáció van, a mikrovezérlő erőforrásának korlátai miatt. Ennek matematikai hatása, továbbá a mikrovezérlőben végbemenő – általában egészszám-alapú – számítások hatása is a modell része.

Eredmények összehasonlítása más kutatási eredményekkel:

A SPDM¹⁰ robot validációs toleranciameghatározásánál elsősorban a szimuláció és validáció célját vették figyelembe, illetve a korábbi szimulációs eredményeket [Ma, Ou, 2004]. Az én megoldásom csak abban tér el ettől, hogy emellett a mérési hibákat és a modell ismert pontatlanságait is hangsúlyosan figyelembe vettem.

A Szabad(ka)-II robotnál egyszerre maximum 45 modellparamétert becsültem meg PSO kereső módszerrel. Hasonlóképpen egy másik mobil robot fuzzy szabályozójának 21 paraméterét optimalizáltunk egyszerre [21]. PSO kereső algoritmust mások is használtak komplex modellillesztésre, például dinamikus robot modell paramétereinek illesztésére [Jahandideh, Hossein, 2012]. Elméleti szinten is kutatták ezt a módszert, komplex nemlineáris dinamikus rendszerek robusztus illesztésére [Majhi, Babita, and Ganapati Panda, 2011].

A roboton végzett mérésekkel és a validációs stratégiával hitelesítettem a modellt. A motoráramokban jelentkező lényeges eltérések okát megmagyaráztam, és szándékosan nem bővítettem tovább a szimulációs modellt. Emellett három lényeges dolgot fedtem fel, melyekkel egyrészt megismertem azokat az okokat, melyek a modell és a valós robot közötti különbséget okozzák, másrészt megmutatták, hogy hol tökéletlen a modell, illetve a robot.

2. tézis

Járó robotok dinamikai modellezésénél a dinamikai modell hibáinak fő okai: a) a robot csuklójánál jelentkező holtjáték, ha nincs modellezve, b) a föld-kontakt approximációs modell – ami a járásszimulálás folyamán nem realizisztikus tapadást okoz a láb és a föld találkozásánál, ezáltal hamis járásirányú lassulást és hamis áramhullámalakot eredményez, és c) a hajtómű¹¹ approximációs modellje, ami nem tartalmazza a belső nemlineáris súrlódást [7].

Szabad(ka)-II robot esetében: A holtjátékot más szenzorral, egy külső potenciométerrel mértem, mivel a motorokra szerelt enkóderek után jelentkezik a holtjáték. Mivel a szabályzó nem kap visszaigazolást erről, ezért a járás minőségére károsan hat ki ez a jelenség. A hajtómű belső nemlineáris súrlódását nem modelleztem, ezért a szimuláció nem úgy viselkedik a lábról visszaható erőkkkel szemben, mint a valós robot. Emiatt a szimuláció más áramgörbét és gyorsulás esetén más áram/nyomatékkülönbséget mutat az első és hátsó lábak között.

Eredmények összehasonlítása más kutatási eredményekkel:

A föld-kontakt modellezésére ugyanilyen rugó-csillapító alapú közelítő módszereket használnak, gyakorlatilag nincs más elfogadott módszer [Woering, 2011], [Hutter és Naf, 2011], [Grizzle et al., 2010], [Duindam, 2006]. A csuklójánál jelentkező holtjáték modellezése ritka robotikában, mivel a legtöbb robot mechanikai felépítéséből kifolyólag ez elhanyagolható. A hajtómű precízebb dinamikai modellezése egy specifikus terület, amellyel

⁹ Relative Mean Absolute Error.

¹⁰ Special Purpose Dexterous Manipulator.

¹¹ Gearbox.

a jövőben érdemes lenne foglalkozni.

Optimalizációs módszer kiválasztása

A szabályozót és a lábpályagörbe változóit elsősorban azért fontos a megfelelő optimalizációs eljárással beállítani, mert a szimulációs számítások mennyiségére tekintettel nem mindegy, hogy egy napot, egy hónapot vagy egy évet kell várni az eredményre. Továbbá minden módszernek vannak erősségei és gyengeségei, amelyek megértése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a kapott eredmény igazolhatóan csak egy lokális vagy a globális optimum, vagy legalább közel van hozzá. A valós globális optimum apriori ismeretlen.¹²

Sokdimenziós és erősen nem lineáris rendszereknél leginkább heurisztikus és lágy számítási eljárásokkal lehet gyorsan megtalálni az optimumot vagy annak környékét. Ilyen esetekben nem az egzakt optimum a fontos, hiszen a modell és a valóság közötti bizonytalanság és különbség miatt ez nagyobb területet képez.

Létrehoztam tipikus tesztfüggvényeket, ismert optimummal, amelyeken versenyeztettem 12 kereső algoritmust, ahol a pontosságot és gyorsaságot egyaránt vizsgáltam. A tesztfüggvények tulajdonságait vegyesen állítottam össze, úgymint a kisebb vagy nagyobb dimenziószám, folytonos vagy szakadós, vegyes egész számú vagy csak lebegő, véletlen szám tartalmú vagy egzakt változókkal. Mindegyik módszert százszor lefuttattam a gyors tesztfüggvényeken, miközben véletlen értékeket adtam a módszer saját hiperparamétereire. A számomra fontos tesztfüggvényeken az egyik legjobb eredményt a részecskekeraj módszer¹³ érte el (PSO). Ezért ezt a módszert alkalmaztam a Szabad(ka)-II robot fuzzy szabályozójának optimalizálására is.

3. tézis

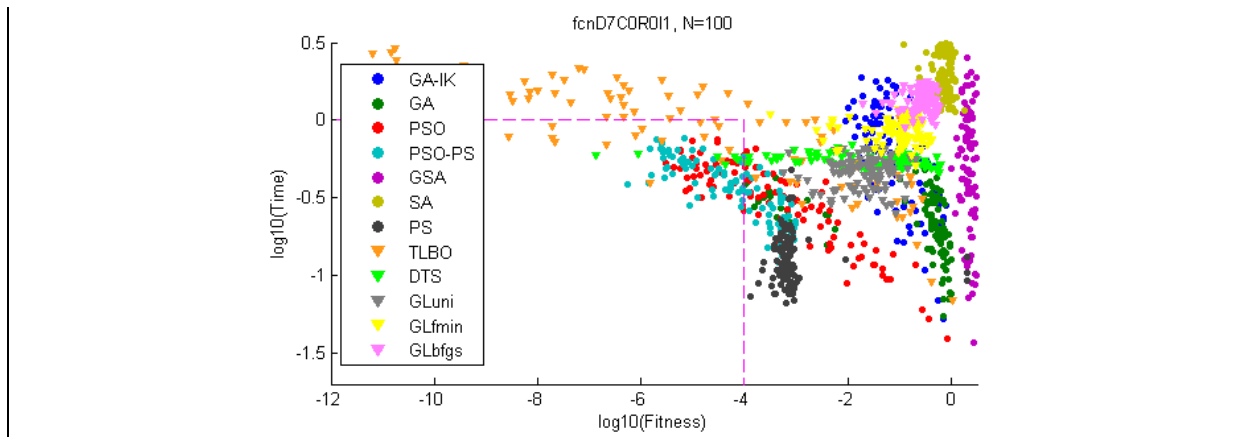
A kiválasztott hétdimenziós, nem folytonos, véletlen számokat nem tartalmazó és vegyes egész számú változókat tartalmazó tesztfüggvény ($f_{D7C0R0I1}$) tulajdonságaiban hasonlít a járó robot modelloptimalizálási probléma jellegére [6]. Erre a tesztfüggvényre a leghatékonyabb heurisztikus optimumkereső algoritmus a részecskekeraj módszer (PSO) [6]. A 12 kiválasztott algoritmus közül átlagosan a PSO módszer közelítette meg leginkább az optimumot ugyanannyi függvényhívás mellett úgy, hogy mindegyik algoritmus százszor futott változó hiperparaméterekkel. A futtatott tesztfüggvény:

$$f_{D7C0R0I1} = \left| \begin{aligned} & \left| 1 + \frac{1}{0.1 \text{round}(10x_1) - 0.9} \right| + \sqrt{|0.1 \text{round}(10x_3) + 0.2|} + \\ & + (x_2 + 0.5)^2 + \sqrt{|x_4 + 0.6|} + \frac{|x_6 - 8|}{10} + \text{sgn}(x_7 + 0.4) \\ & + \begin{cases} \log_2(|x_5 + 1.3| + 1), & x_5 \geq -0.3 \\ \log_2(|1.8 - x_5| + 1), & x_5 < -0.3 \end{cases} \\ & -1 \leq x_i \leq 1 \quad i = \{1, 2, 3, 4, 5, 7\}, \quad 0 \leq x_6 \leq 10 \\ & \min(f_{D7C0R0I1}) = 0 \end{aligned} \right|$$

A következő ábra mutatja a kereső módszerek versenyeztetési eredményét, ahol a legjobb eredményeket (bal alsó sarkot) a PSO és PSO-PS hibrid algoritmus érte el.

¹² Egyszerűbb analitikus függvények esetén a globális optimum kiszámítható többféle módon, vagy már eleve ismert, mint például tesztfüggvények esetében. Viszont a „fekete doboz” típusú problémáknál – mint amilyen a Szabad(ka)-II komplex robotos esete is – az igazi globális optimum csak akkor lesz ismert, ha azt bizonyítottan megtalálták.

¹³ Particle Swarm Optimization – (PSO).



Szabad(ka)-II robot esetében a PSO kereső algoritmus hatékonysága igazolva lett a járó robot szabályozójának, illetve lábpályagörbéjének optimalizációjával is. Genetikus algoritmushoz képest a PSO lényegesen jobb eredményt ért el, kevesebb függvényhívással [22], [5].

Eredmények összehasonlítása más kutatási eredményekkel:

Hasonló versenyztetés található a [Rios and Sahinidis, 2013] kutatásában, ahol a PSO szintén nagyon jó eredményt ért el. Tesztfüggvények helyett az optimalizációmódszereket összehasonlították (ANFIS, PSO és más módszerek) fuzzy szabályzón [Shoorehdeli et al., 2009]. PSO kereső algoritmust használtak szintén mobil robotok fuzzy szabályzó optimalizálásához [Wong et al., 2008] cikkében. [Odry, Ákos, 2018] Kálmán szűrő paramétereinek optimalizálása szintén PSO kereséssel történt, három ismeretlen becslésre.

Robot hajtásminőségének meghatározása

A szabályozási rendszerek megfelelő beállításához, minősítéséhez vagy összehasonlításához meg kell határozni a minőség számszerű értékét. A dinamikus rendszerek minőségi szabályozásának meghatározása rendszerint multiobjektív, mivel a működés több szempontnak is meg kell, hogy feleljen.

Fontos szempont, hogy biztosítsuk a szabályozás robusztusságát a zajokkal és paraméter-bizonytalanságokkal szemben. A valós rendszerekhez egy konkrét (nem Pareto halmaz) és általában robusztus optimumra van szükség, hiszen eltérés tapasztalható a szimuláció és a mérőeszközökkel kiértékelt valós berendezés között.

Továbbá fontos az is, hogy a minőség számszerűsítését olyan mérésekre alapozzuk, amelyek a valós rendszeren is mérhetők (nemcsak a modellben, hanem a berendezésen is), hiszen csak így lehet validálni. Például a nem mért nyomaték helyett a mért DC motoráram is használható, viszont a szimulációban is azt az értéket kell mérni.

Ha az optimalizálandó rendszer minősége multiobjektív (többcélú), akkor csak úgy lehet egy végső megoldást találni, ha meghatározzuk a megfelelő kompromisszumokat a különböző célok között, létrehozva egy globális haszonfüggvényt (másszóval fitnessfüggvényt). Ha a szimuláció multiszcenáriós jellegű, akkor ugyanezek az elvek érvényesek, csak két dimenzióban. A többcélú minőség összevonását valamilyen dominancia alapján lehet végrehajtani, hogy végül egy skalár megoldást válasszunk ki. Például a 3. tézis képletében az átlagsebesség a négyzetben van, ahol ez a kitevő maga a dominancia-paraméter.

Jobb esetben a döntést hozó vagy a tervező fel tudja állítani azokat a fontossági sorrendeket,

ami alapján egy haszonfüggvény felállítható a célok összevonására, a kapott megoldás ezáltal elfogadható lesz. A gyakorlat olykor azt mutatja, hogy a kapott eredmény kiértékelése után tudja a tervező módosítani a célok dominanciáját, hiszen akkor szembesül a rendszer eredménye és az elvárt optimum közötti különbséggel. Ez ciklikus javulást tud hozni, míg az eredmény valóban kielégíti az elvárásokat. A kompromisszumos súlyparaméterek meghatározása kísérletezéssel igen nagy útvesztő, ha három vagy annál több célfüggvényünk van. Többcélú hajtásoptimalizáláskor a dominancia-paraméterek változtatása legalább olyan mértékben befolyásolja a megoldását, mint maga az optimalizáló algoritmus teljesítménye. Ezért a dominancia-paraméterek meghatározására legalább akkora hangsúlyt kell fektetni a kutatásban, mint az optimumkeresés módjára.

Ha a mobil robot rendeltetészerű használata többféle típusú mozgást felölel, akkor ezek a szimulációs modellben különféle scenáriókat alkotnak. Általában a szimuláció része több olyan környezeti vagy küldetési paraméter, amely nem tartozik az optimalizálandó paraméterekhez, ezért ezek változtatása különféle szimulációs scenáriót alkot. Például egy robot esetében a talaj érdessége vagy lejtése olyan paraméter, amely nem része a robotszerkezet vagy szabályzó paramétereinek, amelyeket optimalizálni szeretnénk. Ezen külső paraméterek tipikus értékeivel egy multiszenáriós szimulációt lehet létrehozni, ahol a céloptimum egyszerre minden scenárióra van keresve. Például a robot optimalizált járását a különböző „tipikus” talajérdességekre egyaránt keressük. Ha csak egy scenárióra fut a kereső algoritmus, akkor olyan megoldást talál, amely a többi scenárióra ismeretlen minőséget mutat. Így a minőségmérés és a kapott eredmény robusztussága nem lesz ellenőrzött.

4. tézis

Járó robot járásminőségének definiálására egy többcélú kritérium alkalmazható, amely magába foglalja a kis energiafogyasztást, gyors járást, rázkódásmentességet és robusztus járást jellemző kritériumokat [2], [12]:

$$F = \frac{\overline{V}_X^2}{E_{WALK} \cdot F_{GEAR} \cdot F_{ACC} \cdot F_{ANGACC} \cdot (|Z_{LOSS}| + b)}$$

Ahol: F – a globális skalár fitness érték, melynek a maximuma a keresett érték; \overline{V}_X – a járás irányában mutató sebesség; E_{WALK} – szükséges elektromos energia egy méter távolság megtételéhez; F_{GEAR} – a hajtóművek összeadott nyomatékának négyzetes középértéke; F_{ACC} – a robottest gyorsulásvektor abszolút értékének négyzetes középértéke; F_{ANGACC} – a robottest szöggyorsulásvektor abszolút értékének négyzetes középértéke; Z_{LOSS} – a robottest magasságának vesztese függőleges Z irányban a járás alatt (relatív a talajhoz képest); b – egy eltolás a zéróközeli hatás csökkentésére, empirikusan meghatározott.

Célszerű, hogy a szimulációs modell több különböző scenárió esetében egyidőben legyen vizsgálva. A scenáriókat úgy kell megválasztani, hogy azok reprezentálják a rendeltetészerű használatot, vagyis ennek tipikus eseteit. Olyan optimumot kell keresni, ami az összes vizsgált scenárióra érvényes, ezért az optimalizációban az összes scenárióra egyszerre kell keresni egy kompromisszumos robusztus optimumot [8].

Szabad(ka)-II robot esetében a scenáriókat bemutató jelleggel határoztam meg: egyenes járás gyorsabb és lassabb tempóban, járás enyhe fordulással, járás emelkedőn felfelé, járás 2 kg tehersúllyal gyorsabb és lassabb tempóban.

Eredmények összehasonlítása más kutatási eredményekkel:

Mobil robotoknál a leggyakoribb minőségi kritérium a maximális előrehaladás, minimális energiahasználat mellett [Iagnemma and Dubowsky, 2004]. Továbbá a merev ütközések okozta nagy gyorsulások és az ütközések számának minimalizálását kutatják a robotikában [Carbone, 2011]. Viszont az én javaslatomhoz hasonló mobil robot járásának minőségére vonatkozó célfüggvényt nem találtam az irodalomban.

Hasonlóképpen a többszenáriós megoldást javasolja [Fadel et al., 2005] az ilyen típusú rendszerek szimulálására. Arra vonatkozóan, hogy hány és milyen szenáriót kell meghatározni, nincs arany szabály, például [Ullah et al., 2013] két szenárióval írta le a rendszert. Többszenáriós problémáknál általában az összes szenárióra számolt összes célfüggvényérték összevonásával kezelik [Fadel et al., 2005], [Zhu et al., 2014] úgy, ahogy én is a Szabad(ka)-II robot esetében.

Fuzzy-PI motor szabályzó fejlesztése és paramétereinek optimalizálása

A robotban a kutatásom elején egy nem optimalizált hajtásszabályozás volt beépítve, egy P motorszabályzóval és *spline* lábpályagörbe-számítással. A szimulációs modellen fejlesztett és optimalizált járásszabályzás végső struktúrája úgy lett megtervezve, hogy beépíthető legyen a robot kis teljesítményű mikrovezérlőibe, ennek helyére. Ez meg is történt, és néhány olyan egyszerűbb szenáriót el tudtam végezni a robottal, amely a régi rendszerrel is le lett mérve. Így lehetőségem volt ezeket a méréseket összehasonlítani, tehát az előző nem optimalizált hajtást az általam kifejlesztett hajtáshoz képest. A két rendszer közötti különbség nemcsak maga a motorszabályzó, hanem a mintavételezések helyes megválasztása, ezek összehangolása és az optimális lábpályagörbe kifejlesztése is.

A Szabad(ka)-II robot szabályozási körébe visszacsatoltam a motor áramát, amely olyan plusz információval látja el a szabályozót, amellyel robusztusabb szabályozási jelleget lehet kialakítani. A motor áramából becsülni lehet a nyomaték nagyságát, amely a mechanikai terhelést jellemzi, és az áramot a mechanikai szerkezet védelmére felhasználtam. A gyorsulásmérő pedig a berendezés dinamikájáról ad információt, főleg a nem kívánt káros rezgésekről szerezhető információ. Például ha a robot ütközik, leesik vagy a lába beakad, és nem kap magasabb irányítási szintről utasítást arra, hogy módosítsa a tervezett mozgást, akkor a motorszabályzó szintjén meg lehet védeni az elektromechanikát egy puhább vagy inverz irányú szabályzási jelleggel. Ugyanezen elv alapján a kiugró áramfelvételeket is csökkenteni lehet, amely szintén kíméli mind a mechanikát, mind az akkumulátorokat.

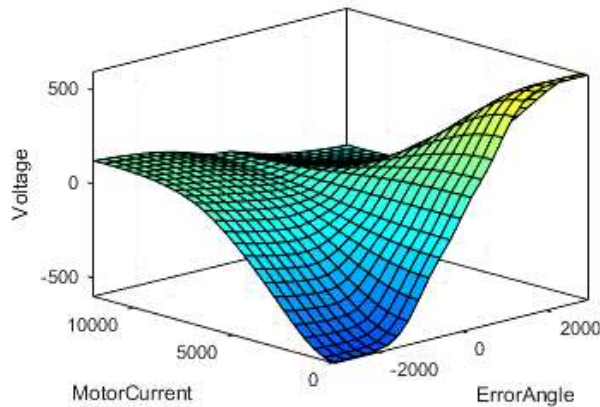
5. tézis

A hajtásszabályozás minőségének mérésével ellenőriztem, hogy a kidolgozott fuzzy-alapú irányítás jobb minőséget mutat-e más szabályzókhöz képest (például a klasszikus PID szabályzási eljárás) [3] [10]. Az összehasonlításhoz a referenciaszabályzóknak is a lehető legjobb beállításával kell elvégezni a tesztek [6] [10]¹⁴.

A motor áramának visszacsatolása a fuzzy szabályzóba lehetőséget kínál, hogy puhább (nemlineáris) jelleget vagy akár inverz irányú hajtást biztosítson [10]. A következő kiegészítő szabályt lehet felállítani [1] [3]: ha a motor árama a névlegesnél, vagy valamilyen normál értéknél nagyobb, akkor a beavatkozó feszültséget erősen olyan érték felé kell hajtani, amely a motort a tehernyomatékkal megegyező irányba hajtja, hogy

¹⁴ A lehető legjobb paramétereket egyforma optimalizációval érdemes megkeresni, az objektív összehasonlítás érdekében [6].

csökkenjen a motorban kialakuló elektromotoros nyomaték, ezáltal az áram is csökken. Ez egy ellenkező irány, mint amit az általános követő szabályzás igényel. A következő ábra bemutat egy fuzzy szabályzót példaként, ahol a első bemenet a szöghiba (*ErrorAngle*), a második bemenet a motor abszolút árama (*MotorCurrent*), a kimenet pedig a motorfeszültség (*Voltage*) [11].



Szabad(ka)-II robot esetében az optimalizált Fuzzy-PI szabályzó átlagosan 20%-kal jobb globális fitnessértéket ért el, mint az optimalizált PID szabályzó [6].

Az egész optimalizált hajtási rendszer 27%-kal gyorsabb és 10%-kal kisebb energiafogyasztást tudott elérni egy korábbi nem optimalizált programhoz képest [11].

Eredmények összehasonlítása más kutatási eredményekkel:

[Santos, M et al., 1996] kutatásában a Fuzzy-PID szabályzókat is összehasonlította a tradicionális PID szabályzóval. Habár a PID szabályzó értékeit nem kereső algoritlussal határozta meg, hanem egy klasszikus behangoló módszerrel (Ziegler-Nichols módszer). Számos fuzzy-PID szabályzó kutatás viszont nem hasonlítja eredményét az egyszerű PID-hez, például [Mazhari, Sufian, 2008], ezáltal a fuzzy logika előnye nincs kifejezve.

Ehhez hasonlóan [Wang et al., 2009] a motor áramát visszavezették a fuzzy szabályzóba, viszont a szerzők nem magyarázták el a motor áramának szerepét a szabályzásban.

Egy kerekes robot modell szabályzása esetén a fuzzy lényegesen jobb minőségi eredményeket mutatott mint a klasszikus P szabályzó, ahol szintén többcélú a minőség meghatározása [9].

5. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A bemutatott kutatás eredményei és a kidolgozott stratégiai módszerek segítséget nyújthatnak olyan elektromechanikai rendszerek modellezéséhez, melyek elsősorban szabályozás kifejlesztésére vannak építve. A járó robotok elsődleges célcsoportok, ahol a láb-talaj kapcsolatból eredő nemlineáris események komplexsége teszik a rendszert. Az 1. tézis módszert ad a járó robotok modellvalidációjához, a beágyazott szabályzók helyes modellezésében ad irányt, és rámutat, hogy milyen algoritmusokkal érdemes a modellillesztést elvégezni, amikor sok ismeretlenről és komplex feketedoboz-modellről van szó. A 2. tézis rámutat, hogy járó robotok dinamikai modellezésénél melyek azok a pontatlanságok, amelyek a lényeges különbségeket okozzák a valóság és a szimuláció között.

A 4. tézisnél bemutatott eredmények felhasználhatók ezen berendezések és mobil robotok hajtásminőségének méréséhez és értékeléséhez. Különösen akkor, amikor a minőség többcélú, amikor a berendezést scenáriókkal lehet leírni és amikor robusztus megoldásra van szükség. A bemutatott eljárás jó alapot nyújt olyan szabályzások minőségének számszerűsítésére, ahol az energiahatékonyság mellett a következő minőségi követelmények is fennállnak: a vibráció csökkentése, az élettartam-növelés, a precízebb koordináció és a zajcsökkentés. A 4. tézis egy működő javaslatot mutat járó robot járásminőségének meghatározására, továbbá rámutat arra, hogy milyen esetben szükséges scenáriókat meghatározni az optimalizáláshoz, és hogy függ össze ez a robusztus megoldással.

A 3. és 5. téziseknél felsorolt kutatási eredmények felhasználhatók elektromotorok fuzzy alapú szabályzásához, elsősorban ott, ahol változó környezet és terhelés lép fel, és ezáltal bizonyos szempontokból optimális és robusztus szabályzásra van szükség. Továbbá olyan járó robotok lábmeghajtásához, ahol az áramvisszacsatolás által puhább szabályzásra van igény az elektromechanika védelmében. Főleg járó robotok esetében az energiatakarékosság és a külső behatások elleni védelem a legfontosabb feladat. Olyan rendszerek motorjainak szabályozásánál, melyeknél fontos a kis fogyasztás (akkumulátoros, napelemes járművek, űrrobotok). A 3. tézis eredménye, hogy sokdimenziós, nem folytonos és vegyes egész számokat tartalmazó optimalizációs problémára a részecske-alapú módszer hatékony kereső algoritmusnak bizonyul. Az 5. tézis bemutat egy olyan fuzzy motor szabályzót, amely a szöghiba mellett a motor áramát is figyelembe veszi, és azt felhasználja arra, hogy erős nyomaték esetén a szabályzó puha vagy akár inverz szabályzási jelleget biztosítson.

A vizsgált módszerek nemcsak új fejlesztések esetén alkalmazhatók, hanem régebbi, már meglévő rendszerek továbbfejlesztése esetén is, mindössze szoftveres változtatások elvégzésével. Ilyenkor lényeges szempont, hogy az új szabályzót be lehessen ágyazni a régebbi kis erőforrású mikrovezérlőkbe.

6. Irodalmi hivatkozások listája

- Arakawa, Takemasa, and Toshio Fukuda (1996) "Natural motion trajectory generation of biped locomotion robot using genetic algorithm through energy optimization." *Systems, Man, and Cybernetics*, 1996., IEEE International Conference on. Vol. 2. DOI: [10.1109/ICSMC.1996.571368](https://doi.org/10.1109/ICSMC.1996.571368)
- Asija, Divya (2010) „Speed control of induction motor using fuzzy-PI controller.” *Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*, IEEE International Conference on. Vol 2. DOI: [10.1109/ICMEE.2010.5558463](https://doi.org/10.1109/ICMEE.2010.5558463)
- Augusto, O. B., Bennis, F., Caro, S. (2012)„Multiobjective engineering design optimization problems: a sensitivity analysis approach”, *Pesquisa Operacional*, 32(3) pp: 575-596, DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382012005000028>
- Carbone, G. (2011) „Stiffness analysis and experimental validation of robotic systems”. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 6(2), pp:182-196.
- Carbone, G. and Ceccarelli, M. (2008). „A low-cost easy-operation hexapod walking machine”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(2), pp:161-166.
- Corke, I. P. (2001) „Robotics toolbox for matlab” (release 6). Manufacturing Science and Technology Pinjarra Hills, Australia
- De Santos, P. Gonzalez, Elena Garcia, and Joaquin Estremera. (2007) "Improving walking-robot performances by optimizing leg distribution." *Autonomous Robots* 23(4), pp: 247-258.
- De Santos, P. Gonzalez, et al. (2009) "Minimizing energy consumption in hexapod robots." *Advanced Robotics*, 23(6), pp: 681-704.
- Duindam, V. (2006). „Port-based modeling and control for efficient bipedal walking robots”. Ph.D. thesis, University of Twente.
- Erdogmus, Pakize, and Metin Toz. (2012): „Heuristic optimization algorithms in robotics.” *Serial and Parallel Robot Manipulators-Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*. InTech, DOI: [10.5772/30110](https://doi.org/10.5772/30110)
- Fadel, G., Haque, I., Blouin, V., and Wiecek, M. (2005): „Multi-criteria multi-scenario approaches in the design of vehicles”. In 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization; DOI: [10.1.1.74.3818](https://doi.org/10.1.1.74.3818)
- Grizzle, J., Chevallereau, C., Ames, D., and Sinnet, W. (2010): „3D bipedal robotic walking: Models, feedback control, and open problems”. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(14), pp: 505-532
- Haynes, G. Clark, Alfred A. Rizzi, and Daniel E. Koditschek (2012): "Multistable phase regulation for robust steady and transitional legged gaits." *The International Journal of Robotics Research*, 31(14), pp: 1712-1738.
- Hutter, M. and Naf, D. (2011): „Quadruped walking/running simulation”. Spring Term. Semester-Thesis in ETH Zurich.
- Iagnemma, K. and Dubowsky, S. (2004): „Traction control of wheeled robotic vehicles in rough terrain with application to planetary rovers”. *The international Journal of robotics research*, 23(10-11), pp:1029-1040.
- Jahandideh, Hossein, and Mehrzad Namvar. (2012): "Use of PSO in parameter estimation of robot dynamics; Part two: Robustness." *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 16th IEEE International Conference on.
- Juang, Chia-Feng, Yu-Cheng Chang, and Che-Meng Hsiao. (2011): "Evolving gaits of a hexapod robot by recurrent neural networks with symbiotic species-based particle swarm optimization." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58(7), pp:3110-3119.
- Kazuo Tanaka, Takayuki Ikeda, Hua O. Wang (1996): “Robust Stabilization of a Class of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic Stabilizability, Hinf Control Theory, and Linear Matrix Inequalities”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(1), pp:1-13
- Kim, Jinwook, Yoon-Gu Kim, and Jinung An. (2011): "A fuzzy obstacle avoidance controller using a look-up-table sharing method and its applications for mobile robots." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 8(5), pp:39-48.
- Lin, Ben Sheng, and Shin-Min Song (2001): "Dynamic modeling, stability, and energy efficiency of a quadrupedal walking machine." *Journal of Field Robotics*, (18)11, pp: 657-670.

- Luis Miguel Rios, Nikolaos V. Sahinidis (2013): „Derivative-Free Optimization, A Review of Algorithms and Comparison of Software Implementations”. *Journal of Global Optimization*, (56)3, pp: 1247-1293
- Ma, Ou, et al. (2004): "On the validation of SPDM task verification facility." *Journal of Field Robotics* 21(5), pp: 219-235.
- Majhi, Babita, and Ganapati Panda (2011): "Robust identification of nonlinear complex systems using low complexity ANN and particle swarm optimization technique." *Expert Systems with Applications* 38(1) pp: 321-333.
- Malki, Heidar A., et al. (1997): "Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 5(3) pp: 371-378.
- Mazhari, Sufian Ashraf, and Surendra Kumar (2008): "Heuristic Search Algorithms for Tuning PUMA 560 Fuzzy PID Controller", *International Journal of Electrical and Information Engineering*, 2(9) pp: 2024-2033
- Odry, Ákos, et al. (2018): "Kalman filter for mobile-robot attitude estimation: Novel optimized and adaptive solutions." *Mechanical Systems and Signal Processing* 110, pp: 569-589.
- Pratihari, Dilip Kumar, Kalyanmoy Deb, and Amitabha Ghosh (2000): "Optimal turning gait of a six-legged robot using a GA-fuzzy approach" *AI EDAM*, 14(3), pp:207-219.
- Precup, Radu-Emil, and Hans Hellendoorn (2011): "A survey on industrial applications of fuzzy control." *Computers in Industry* 62(3), pp: 213-226.
- Radu-Emil Precup, Radu-Codrut David, Emil M. Petriu, Mircea-Bogdan Radac, Stefan Preitl, János C. Fodor (2013): „Evolutionary Optimization-Based Tuning of Low-Cost Fuzzy Controllers for Servo Systems”, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 38, pp: 74–84
- Rios, L. M. and Sahinidis, N. V. (2013): „Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations”, *Journal of Global Optimization*, 56(3), pp:1247-1293
- Sakr, Ziad, and Emil M. Petriu (2007): "Hexapod robot locomotion using a fuzzy controller." *Robotic and Sensors Environments*, DOI: [10.1109/ROSE.2007.4373969](https://doi.org/10.1109/ROSE.2007.4373969)
- Santos, M., S. Dormido, and J. M. De La Cruz (1996): "Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers." *Fuzzy Systems, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on*. Vol. 3. DOI: [10.1109/FUZZY.1996.552571](https://doi.org/10.1109/FUZZY.1996.552571)
- Shoorehdeli, M. A., Teshnehlab, M., and Sedigh, A. K. (2009): „Training anfis as an identifier with intelligent hybrid stable learning algorithm based on particle swarm optimization and extended kalman filter”, *Fuzzy Sets and Systems*, 160(7), pp: 922-948
- Sivanandam, S. N., Sai Sumathi, and S. N. Deepa (2007): „Introduction to fuzzy logic using MATLAB”. Vol. 1. Berlin: Springer,
- SM Mikki, AA Kishk (2008): „Particle Swarm Optimization: A Physics-Based Approach” Morgan & Claypool
- Tiwary, Neha, A. Rathinam, and S. Ajitha (2014): „Design of Hybrid Fuzzy-PI controller for speed control of Brushless DC motor” *Electronics, Communication and Instrumentation (ICECI)*, IEEE International Conference on. DOI: [10.1109/ICECI.2014.6767360](https://doi.org/10.1109/ICECI.2014.6767360)
- Ullah, I., Ullah, F., Ullah, Q., and Shin, S. (2013): „Integrated tracking and accident avoidance system for mobile robots” *International Journal of Control, Automation and Systems*, 11(6), pp:1253-1265
- Von Twickel, A., Hild, M., Siedel, T., Patel, V., and Pasemann, F. (2012): „Neural control of a modular multi-legged walking machine: Simulation and hardware”, *Robotics and Autonomous Systems*, 60(2), pp: 227-241.
- Wang, Ming-Shyan, Ying-Shieh Kung, and Yi-Ming Tu (2009): "Fuzzy logic control design for a stair-climbing robot." *International Journal of Fuzzy Systems* 11(3), pp: 174-182.
- Woering, R. (2011): „Simulating the "first steps" of a walking hexapod robot” Ph.D. thesis, Master's thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven
- Wong, C.-C., Wang, H.-Y., Li, S.-A. (2008): „PSO-based motion fuzzy controller design for mobile robots”, *International Journal of Fuzzy Systems*, 10(1), pp: 284-292
- Zhu, L., Deb, K., and Kulkarni, S. (2014): „Optimization of multi-scenario problems using multicriterion methods: A case study on byzantine agreement problem”, COIN Report Number 2014002

7. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] Kecskés, I., Odry, P. (2010): „Protective Fuzzy Control of Hexapod Walking Robot Driver in Case of Walking and Dropping”, Computational Intelligence in Engineering. Studies in Computational Intelligence, vol 313. Springer, Berlin, Heidelberg, Volume 313, pp: 205-217, DOI: [10.1007/978-3-642-15220-7_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15220-7_17)
- [2] Pap, Z., Kecskés, I., Burkus, E., Bazsó, F., Odry, P. (2010): „Optimization of the Hexapod Robot Walking by Genetic Algorithm”, SISY, 8th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, pp: 121-126, DOI: [10.1109/SISY.2010.5647242](https://doi.org/10.1109/SISY.2010.5647242)
- [3] Kecskés, I., Odry, P. (2009): „Full kinematic and dynamic modeling of „Szabad(ka)-Duna” Hexapod”, SISY, International Symposium on IEEE 9th Intelligent Systems and Informatics, pp: 215-219, DOI: [10.1109/SISY.2009.5291160](https://doi.org/10.1109/SISY.2009.5291160)
- [4] Kecskés, I., Odry, P. (2013): „Simple Definition of Adequate Fixed Time-Step Size of Szabad(ka)-II Robot Model”, ICCCY, 9th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, pp: 315-320, DOI: [10.1109/ICCCYb.2013.6617610](https://doi.org/10.1109/ICCCYb.2013.6617610)
- [5] Kecskés, I., Burkus, E., Odry, P. (2014): „Swarm-Based Optimizations in Hexapod Robot Walking”, SACI 9th IEEE International Symposium on, pp: 123-127, DOI: [10.1109/SACI.2014.6840048](https://doi.org/10.1109/SACI.2014.6840048)
- [6] Kecskés, I., Odry, P. (2014): „Optimization of PI and Fuzzy-PI Controllers on Simulation Model of Szabad(ka)-II Walking Robot”, Intech IJARS, 2014, 11:0, DOI: [10.5772/59102](https://doi.org/10.5772/59102)
- [7] I. Kecskés, E. Burkus, F. Bazsó and P. Odry (2017): "Model validation of a hexapod walker robot" Robotica, 35(2), pp: 419-462; DOI: [10.1017/S0263574715000673](https://doi.org/10.1017/S0263574715000673)
- [8] Kecskés, I., Odry, P. (2015): „Multi-scenario Optimization Approach for Fuzzy Control of a Robot-car Model”, SACI, 10th Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, pp: 565-570 DOI: [10.1109/SACI.2015.7208167](https://doi.org/10.1109/SACI.2015.7208167)
- [9] Kecskés, I., Odry, P. (2012): „Fuzzy route control of dynamic model of four-wheeled mobile robot”, LINDI, 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, pp. 215–220, DOI: [10.1109/LINDI.2012.6319490](https://doi.org/10.1109/LINDI.2012.6319490)
- [10] István Kecskés, Ervin Burkus, Zoltán Király, Ákos Odry, Péter Odry (2017): „Competition of motor controllers using a simplified robot leg: PID vs fuzzy logic”, MCSI: 4th IEEE International Conference Mathematics and Computers in Sciences and in Industry, pp: 37-43, DOI: [10.1109/MCSI.2017.16](https://doi.org/10.1109/MCSI.2017.16)
- [11] István Kecskés, Ákos Odry, Ervin Burkus, Péter Odry (2016): "Embedding optimized trajectory and motor controller into the Szabad(ka)-II hexapod robot", SMC, International Conference on. IEEE Systems, Man, and Cybernetics, DOI: [10.1109/SMC.2016.7844435](https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844435)
- [12] Kecskés, I. and Odry, P. (2009): „Walk optimization for hexapod walking robot”, CINTI, Proceedings of 10th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, pp: 12-14.

8. További tudományos közlemények

- [13] Kávai, G., Kecskés, I. (2005): „Motorsabályozás Fuzzy-neurális hálózattal MSP430F14X mikrovezérlővel”, VMTDK 2005, <http://vmtdk.edu.rs/dokumentumok/vmtdk-2005-rezumeeket.pdf>
- [14] Kávai, G., Kecskés, I. (2005): „Motorsabályozás Fuzzy-neurális hálózattal”, BMF TDK, http://www.uni-obuda.hu/statikus/tdk_pdf/05TDKPROGKVK.pdf
- [15] Odry, P., Kávai, G., Kecskés, I., Búcsú, O., Szakáll, T., Farkas, I. (2006): „Fuzzy-Neural motor control with MSP430x14x”, XXIIIth Kandó Conference 2006, ISBN:9637154426, http://inf.duf.hu/publikaciok/pub_lista2.php?dolg_id=36
- [16] Kecskés, I., Székács, L., Odry, P. (2015): „Lookup Table Based Fuzzy Controller Implementation in Low-power Microcontrollers of Hexapod Robot Szabad(ka)-II”, 3rd International Conference & Workshop Mechatronics in Practice and Education – MECHEDU, pp: 76-81, <http://mechedu.vts.su.ac.rs/wp-content/uploads/2015/06/15.pdf>
- [17] Odry, P., Henézi, F., Burkus, E., Halász, A., Kecskés, I., Márki, R., Kuljić, B., Szakáll, T., Máthé, K. (2011): „Application of the FPGA technology in the Analysis of the Biomedical Signals”, SISY, International Symposium on IEEE 9th Intelligent Systems and Informatics, pp: 407-412 DOI: [10.1109/SISY.2011.6034362](https://doi.org/10.1109/SISY.2011.6034362)
- [18] Kecskés, I., Odry, P. (2012): „Fuzzy route control of dynamic model of four-wheeled mobile robot”, LINDI, 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, pp. 215–220, DOI: [10.1109/LINDI.2012.6319490](https://doi.org/10.1109/LINDI.2012.6319490)
- [19] Kecskés, I., Balogh, Z., Odry, P. (2012): „Modeling and Fuzzy Control of a Four-Wheeled Mobile Robot”, SISY, Jubilee International IEE Symposium on Intelligent Systems and Informatics, pp: 205-210, DOI: [10.1109/SISY.2012.6339515](https://doi.org/10.1109/SISY.2012.6339515)
- [20] Tóth, Á., Máthé, K., Burkus, E., Kecskés, I., Király, I., Odry, P., Trampus, P. (2014): „Optimization Procedure For Flaw Detection In Iron Core With Magnetic Field”, Dunakavics könyvek 4. ISBN: 978 963 287 074 8, ISSN 2064-3837
- [21] Á. Odry, I. Kecskés, E. Burkus, P. Odry (2017): „Protective Fuzzy Control of a Two-Wheeled Mobile Pendulum Robot: Design and Optimization” WSEAS Transactions on Systems and Control, 12, pp: 297–306.
- [22] Kecskés, I., Székács, L., Fodor, J. C., Odry, P. (2013): „PSO and GA Optimization Methods Comparison on Simulation Model of a Real Hexapod Robot” ICCCyb, 9th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings, pp: 125-130, DOI: [10.1109/ICCCyb.2013.6617574](https://doi.org/10.1109/ICCCyb.2013.6617574)

Absztrakt

Az elektromechanikai rendszerek minőségi energia-hatékony szabályzása a mai robot technológiai fejlődés egyik fontos kihívása. A szimulációs dinamikai modell megépítése elengedhetetlen, hiszen a robot hajtás szabályzást egy olyan módszerrel lehet optimalizálni, amely jól megbecsülni a robot viselkedését. A minőségi szabályzás fő szempontjai így határozható meg: gyors, energia-hatékony, akkumulátor kímélő, rázkódás-mentes járást biztosít a robotnak. A Szabad(ka)-II hatlábú robot, 18 szabadságfokos beágyazott mechatronikai eszköz, alkalmas összetett hajtás szabályozási feladatok kutatására. Emellett a robot- a környezet- és a szabályzó-paraméterekkel szembeni robusztusság is a kutatásom céljai közé tartozik, mivel az eszköz mechanikai és elektronikai pontatlansága nem elhanyagolható.

Modell validálás: A szimuláció modell verifikálása és validálása alatt felmértem, hogy a szimuláció eredményei megfelelnek-e a valós rendszernek. A validációs eljárást kétszer lett elvégezve, először a hajtás-szabályozás fejlesztése és optimalizálása előtt, majd az után, egy kiválasztott optimális szabályzóval. Az elsöre azért volt szükség hogy egy valóság-hű modellen keressük az optimális szabályzást. A második pedig igazolja, hogy valóban megvalósítottam-e a kitűzött célt. A validálás eredmények klasszifikációjához meghatároztam a toleranciákat illetve várható hibahatárokat a rendszer pontosságának a kimérése és becslése alapján. A validáció során a motor árama lényeges eltérést mutatott, ezért részletesen foglalkoztam ezzel a kérdéskörrel. A robot modell validálás fő lépéseinek meghatározása és az eltérések számszerű és minőségi osztályozása a fő tudományos eredmények.

Optimalizáló algoritmus: Mivel időigényes szimulációs feladatokat kell futtatni az optimalizáló algoritmus hatékonysága kulcskérdéssé vált. Olyan algoritmusok lettek kiválasztva, amelyek a legkevesebb függvényhívással képesek rátalálni az optimumra sok-változós, nem folytonos, nem-lineáris, vegyes egészszámú probléma esetén. Heurisztikus módszereket versenyeztettem gyors tesztfüggvényeken, amelyekbe ilyen hasonló tulajdonságok lettek beépítve, mint ami a robot szimulációra is jellemző. A részecske-raj módszert (PSO) érte el a legjobb eredményt, amelynek implementációját párhuzamosítottam. Egy új és széleskörben alkalmazható módszert kaptam a legjobb optimalizációs kereső algoritmus meghatározására.

Abstract

The high-quality energy-efficient regulation of electromechanical systems is an important challenge for today's robot technology development. The construction of the dynamic simulation model is indispensable to the optimization of robot driving controlling, because such a model estimate adequately the robot's behavior. The main aspects of the controlling's quality can be defined as: fast, energy efficient, battery saver, and ensure vibration-free walking for the robot. The Szabad(ka)-II hexapod robot with 18 DOF embedded mechatronic devices is suitable for complex drive control research. My goals also included achieving robustness concerning robot, environmental and controller parameters since the mechanical and electronic inaccuracy of the device is not negligible.

Model validation: During the verification and validation of the simulation model, I evaluated whether the results of the simulation correspond to the real system. The validation procedure was performed twice, first before the development and optimization of the drive control, then afterwards, using a selected optimal controller. The former was necessary to develop the optimal drive control using a realistic model. The latter was required to prove that the goal had been achieved. For the classification of the validation results, the tolerances and expected error limits were defined based on the measurement and estimation of system accuracy. During validation, the motor current showed a significant difference, therefore this issue was discussed in detail. Determining the main steps of the robot model validation and the numerical and qualitative grading of the differences are the main scientific results.

Optimizer algorithm: Since the simulation tasks to be run were rather time-consuming, the efficiency of the optimization algorithm had become a key issue. Algorithms able to find the optimum with the lowest number of function calls for multi-variable, non-continuous, non-linear, mixed-integer problems were used. Heuristic search methods were tested against each other on quick test functions which incorporate properties similar to those of a robotic simulation problem. The best results were achieved by the particle swarm optimization method (PSO), the implementation of which had been paralleled. A new and widely usable method was created to select the most appropriate optimization search method.

Robusztus több-célú több-szenáriós optimalizálás: Általában a minőségi szabályzás több szempontnak is meg kell, hogy feleljen (például kis fogyasztás, pontosság, gyorsaság, akkumulátor kímélés), ezért a rendszer több-célú (multi-objektív). A szimulációs modell tartalmaz olyan környezeti vagy küldetési paramétereket, amelyek nem tartoznak az optimalizálandó paraméterekhez, de ezek változása különféle szenáriót képez. Ezen paraméterek tipikus értékeivel egy több-szenáriós szimulációt lehet létrehozni, ahol az optimum egyszerre minden szenárióra van keresve. Az ilyen optimum robusztusabb mint ha csak egy szenárióra lenne keresve a megoldás, hiszen a robot rendeltetésszerű használatát a kiválasztott több szenárió reprezentálja.

Fuzzy alapú motor szabályzás: A szimulációs modellezés segítségével fejlesztettem és optimalizáltam egy fuzzy motor szabályzót, amely beágyazható a valós robotba. A kis teljesítményű mikrovezérlőknek megfelelő kereső táblás megoldást fejlesztettem ki a fuzzy szabályzó valós idejű futásához. A motor áramának visszacsatolása a fuzzy szabályzóba lehetőséget kínált, hogy olyan szabályzási jelleget biztosítsak, amely kerüli a nagy áram-nyomaték ingadozásokat. Evvel egy puhább vagy extrém esetben inverz irányú szabályzási jelleg kapható, amely jobban védi az elektromechanikát, valamint az akkumulátorokat. A fuzzy leíró szabályaival könnyen lehet ezt a viselkedést implementálni. A szabályozás minőségének mérésével ellenőrizve lett, hogy a kidolgozott fuzzy alapú irányítás jobb minőséget és robusztusságot mutat a klasszikus PID-hez képest.

Szabad(ka)-II robot esetén a bemutatott hajtás optimalizálás 27%-kal gyorsabb és 10%-kal kisebb energiafogyasztást tudott elérni egy korábbi nem optimalizált programhoz képest.

Robust Multi-Objective Multi-Scenario Optimization: In general, quality motor control needs respond to a number of requirements (such as low power consumption, accuracy, speed, battery saving), so the system is multi-objective. The simulation model includes environmental or mission parameters that are not part of the parameters to be optimized but their variation creates different scenarios. A multi-scenario simulation can be created with the typical values of these parameters where the optimum is searched for all scenarios at the same time. Such optimum is more robust than one achieved through a process using separate scenarios since the intended use of the robot is represented by the multi-scenarios.

Fuzzy Logic Motor Controller: A fuzzy motor controller that can be embedded in the processor of real robot was developed and optimized using the simulation model. A lookup table-type solution for the real time operation of the fuzzy controller suitable in the low power microcontrollers was developed. The feedback of the motor current to the fuzzy controller allowed the option of providing control characteristics that avoid high current-torque fluctuations. This ensures a softer control behavior or, in extreme cases, inverse directional control, which can better protect the electromechanic parts and the batteries. This control behavior can be easily implemented using fuzzy descriptive (linguistic) rules. By measuring the quality of the motor controller, it was checked that the elaborated fuzzy-based control provided better quality and robustness compared to the classic PID control.

In case of the Szabad(ka)-II robot, the presented drive optimization achieve 27% faster locomotion and 10% less power consumption compared to an earlier, non-optimized program.