

**BIO-INSPIRÁLT, KÖLTSÉGHATÉKONY,
CSÖKKENTETT HOLTJÁTÉKÚ BIPEDÁL ROBOT
ÉS EGY ÚJSZERŰ KONCEPCIÓ: AZ EMULÁLT
ELASZTIKUS AKTUÁTOR**



Ph.D. disszertáció tézisei

Veres József

Konzulens:
Dr. Cserey György

Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai Kar

Budapest, 2013

Bevezetés, kitűzött feladatok

A bipedál robotok kutatása két szempontból is fontos. Egyrészt, hogy olyan járó robotot alkothassunk ami képes segítséget nyújtani az embereknek. Például, egy nukleáris katasztrófa esetén, ami sajnos nem is olyan régen a japán Fukushima erőműnél is megtörtént, egy bipedál robot bevethető lenne, amivel emberéleteket lehetne megmenteni. Másrészt, a kétlábú robotok területén végzett kutatások, segíthetnek abban is, hogy jobban megértsük mozgásszervi betegségeket, például az agyvezérelt követő mozgásszervi rehabilitáció kapcsán, vagy akár, hogy hogyan készíthetnénk jobb alsó végtagi protéziseket.

A felső kategóriás emberszerű bipedál rendszerek rendkívül költségesek. Van néhány alsó kategóriás kétlábú robot, például az Aldebaran Robotics által készített NAO, amit az egyetemi kutatások során használnak. Ezek a robotok általában olyan robotikus csuklókat tartalmaznak amelyek standard alkatrészekből állnak. Így a gyártási pontatlanság a hajtás tekintetében szignifikáns holtjátékot okoz, ami a vezérlés szempontjából egy erős nem-lineáris jelenség.

Ezért, kutatásaim elején igyekeztem a bipedál robotok hajtásánál fellépő nem-lineáris jelenségek egy problémájára megoldást adni azáltal, hogy egy bio-inspirált alacsony költségvetésű robotikus csuklót tervezek amely permanens mágneses léptető motoron és alacsony szintű aktív vezérlésen alapszik.

A nem-lineáris jelenségek mellett, a járás természeténél fogva magában foglal olyan dinamikákat is amelyeket a klasszikus robotikának az elmélete nem fed le. Hiszen az ipari robotokkal

szemben, a járó, futó vagy lépcsőn felmenni képes kétlábú robotok alapvetően más megközelítést igényelnek.

A robotikának egy új területe van kialakulóban a *dinamikus járó robotok*. 2006-ban, egy új nemzetközi konferenciát hoztak létre, hogy megoszthassák egymással az ezen területen dolgozó kutatók a kutatási eredményeiket. A központi témák közé tartoznak az energia hatékonyság, a dinamikus stabilitás és az engedékeny aktuátorok témakörei. Az engedékeny (nem merev) aktuátorokról kiderült, hogy létfontosságúak a környezettel való alapvető interakció miatt. Az alatt a félév alatt, amíg Notre Dame-ben lehetőségem nyílt bekapcsolódni James Schmie德勒 Locomotion And Biomechanics Laboratory csoportjának a kutatómukájába, megérthettem a klasszikus robotika elméletének korlátait. Hazatérésem után, egy újszerű koncepciót kezdtem el dolgozni, amelynek a segítségével a bipedál robotok dinamikája egy új szintre emelhető.

Ezért, a kutatásaim végén egy olyan újfajta robotikus aktuátor létrehozásának a lehetőségét vizsgáltam amely képes szoftveresen emulálni különböző típusú elasztikus viselkedéseket avagy létrehozni egy olyan eredendő rugalmasságot amely elengedhetetlen a dinamikus mozgáshoz.

Ennek az újszerű koncepciónak a segítségével, ellentétben a meglévő mechanikai megoldásokkal (mint például az SEA [8]) amelyek a legtöbb esetben egy fix elasztikus viselkedésre korlátozódnak, lehetőség nyílna az elasztikus viselkedés megváltoztatására akár valós időben is. Figyelembe véve a tényt, hogy a rugalmasság emulálása szoftveresen történne, akár egzotikus nem-lineáris karakterisztikák is megvalósíthatóvá válnának.

A vizsgálatok módszerei

A kutatásaimat a robotikán belül a járó robotok területének legújabb eredményei motiválták. Kutatásaim során számos diszciplínához tartozó eszköztárat és kutatást segítő szoftvert alkalmaztam. Munkám során fontosnak tartottam, hogy az elméleti leírás mellett, hardveres megvalósítás is létrejöjjön.

A tervezett rendszerek szimbolikus leíráshoz Mathematica 8 szoftvert használtam a Wolfram Research Inc.-től. A modellek numerikus vizsgálata során a MATLAB 2010-et használtam a MathWorks Inc.-től amelynek számos toolbox-ja volt segítségemre a szimulációk során. Az elektronikai eszközök működését a National Instruments Electronics Workbench-ben teszteltem. A hardveres környezet megalkotásához a nyomtatott áramköröket az Altium Designer 10-ben terveztem. A főbb vezérlési feladatokat PIC típusú Microchip Inc. gyártmányú 16 és 32 bites mikrokontrollerek segítségével végeztem el. A mechanikai CAD szoftverek közül a Solidworks 2010-et használtam, amely nagy segítségemre volt a működő hardveres implementációk készítése során, lehetővé téve a szimulációs eredmények ellenőrzését.

Mind a permanens mágneses léptetőmotor (PMSM) és mind a hibrid léptetőmotor (HSM) modelljét felhasználtam a szimulációim során az aktuátorok pontos viselkedésének vizsgálatához. Az emulált elasztikus aktuátor (EEA) esetében a Hooke és a Kelvin-Vought féle elasztikussági modellt használtam. A nemlineáris típusú elasztikus viselkedés vizsgálata során a bemutatásra kerülő két szabadsági fokú robotláb dinamikájának az egyenlete a rendszer energiáján alapuló Lagrange-Euler metódus segítségével került meghatározásra.

Új tudományos eredmények

1. Tézis: *Bio-inspirált megoldás egy a költséghatékony robotikus aktuátorokat érintő nem-lineáris jelenségre.*

A robotikában leggyakrabban alkalmazott beavatkozók az elektromos motorok. Ezekre általánosságban jellemző, hogy az általuk mozgatott csukló kívánt szögsebességénél több nagyságrenddel gyorsabban forognak. Ezért áttételeket alkalmaznak, hogy a kívánt sebességet elérjék. Ekkor viszont a legtöbb esetben az erőátvitel folytonossága leromlik a belépő holtjáték miatt. Ez egy erős nem-lineáris jelenség amely statikus esetben csak pozícionálási hibát okozhat, de dinamikus esetben akár oszcillációkhoz is vezethet, jelentősen lerontva a visszacsatolt szabályzás teljesítményét.

A holtjáték hatásának Stribeck féle surlódási modellre épülő kompenzációja nemrég került publikálásra [9,10]. Szabályzókat és adaptív szabályzókat is terveztek [11–13] olyan mechanikai rendszerekhez amelyeknek jelentős mértékű holtjátékkal rendelkeznek. Humanoid robotok genetikusan alapú holtjáték kompenzációját pedig a [15] mutatja be.

Általánosságban elmondható, hogy a jelenlegi megoldások igénylik a rendszer részletes, időfüggő modelljének a meglétét amely a gyakorlatban általában nem áll a rendelkezésünkre. Ezért a professzionális robotikai aktuátorokban egy igen költséges mechanikai megoldást, a hullámhajtást alkalmazzák, a közel nulla holtjáték eléréséhez. Ennek a mechanikai megoldásnak a hátránya az erőátvitel megnövekedett rugalmassága és természetesen a nagyon magas költsége is. Egy tipikus humanoid

robotban több tíz aktualizált csukló található, ezért szükség lenne egy költséghatékony robotikus aktuátorra amely csökkentett holtjátékkal rendelkezik.

A tézishez kapcsolódó publikáció: [2].

1.1. Az emberi izomzat flexor-extensor mechanizmusának az inspirációja alapján megterveztem és megvalósítottam egy PMSM alapú robotikus csuklót és kidolgoztam egy alacsonyszintű vezérlő algoritmust aminek a segítségével bemutattam, hogy a robotikus csukló holtjátéka egy nagyságrenddel csökkenthető.

Ahhoz, hogy a megfelelő szabályzás biztosított legyen, még alacsony fordulatszám mellett is, a tervezett aktuátor permanens mágneses léptetőmotorokra (PMSM) épül, amelyek elektronikus kommutációja digitálisan vezérelt zárt-hurokkal történő visszacsatolással rendelkezik. A csukló adott eredeti holtjáték nagyságának az ismeretében egy alacsonyszintű algoritmust dolgoztam ki az effektív csukló holtjáték csökkentésére, felhasználva ugyanazt a mikrovezérlőt amely a motorok zárt-hurkú kommutációját is végzi. Az algoritmus vizsgálatára kidolgoztam egy öt tömeg pontú dinamikus modellt, amely tartalmazza a nem-lineáris holtjáték modellt és a pontos motor modellt is. Numerikus szimuláción keresztül vizsgáltam a folyamatos előrehátra történő mozgást, mivel a mozgás irányának a megváltozása nagy jelentőségű a vizsgált jelenség szempontjából. Az oka ennek, hogy a holttéren való áthaladás közben megszűnik a forgatónyomaték átvitel, majd amikor hirtelen a kontaktus újra létrejön a létrejövő lökés akár tönkre is teheti a meghajtást. 1.(a) ábra egy irányváltást mutat ahol jól látható a holttéren való áthaladás, majd az 1.(c) ábra pedig ugyancsak a szimulációs eredményeit mutatja ugyan annak az irányváltásnak csak a holtjáték csökkentő algoritmus használatát követően.

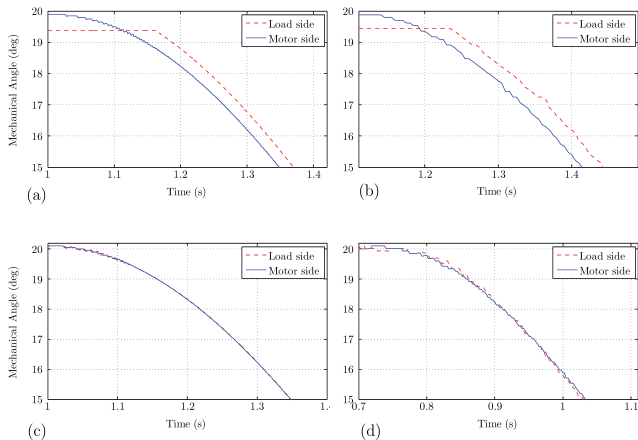


Figure 1: Összehasonlítás a szimulációs (a,c) és kísérleti mérési (b,d) eredmények között, a javasolt robotikus csukló holtjáték csökkentéssel (c,d) és anélkül (a,b) végzett irányváltása közben.

Ahhoz, hogy az elméleti eredményeket alátámaszthassam mérésekkel, megterveztem és megvalósítottam az általam javasolt megoldást hardveres környezetben. Az 1.(b) ábrán látható az előző szimulációval megegyező mozgáshoz tartozó kísérleti mérés eredménye holtjáték redukció nélkül. Az 1.(d) ábrán pedig a holtjáték csökkentéssel történő mérés eredménye látható. Az eredmények alapján az átlagos effektív holtjáték méretke egy nagyságrendel csökkenthető.

Az altézishez kapcsolódó disszertáció fejezet: II.

2. Tézis: *Az emulált elasztikus aktuátor (EEA) újszerű koncepciója lineáris és nem-lineáris karakterisztikájú rugalmasság megvalósításához.*

A klasszikus robotika szerint a meghajtás és a terhelés között az erőátvitelnek nagyon merevnek kell lennie. Az utóbbi évtizedben ez a fajta "the stiffer the better" tradíció megváltozni látszik. Manapság egyre nő a népszerűsége az engedékeny (az angolszász szóhasználatban "compliant") aktuátoroknak. Ennek egyik oka az, hogy így lehetőségünk nyílik a merev erőátvitel adta korlátok leküzdésére mechanikai sokk tűrés, erő szabályzás, stabilitás és biztonságos ember-gép együtt működés tekintetében. Ezen aktuátorok közül talán a legérdekesebb és ami a legnagyobb jelentőséggel bír az a soros elasztikus aktuátor (SEA) [8]. Ez a koncepció egy fizikai rugót használ sorba kapcsolva a hagyományos aktuátor kimenetével. Előnyös tulajdonságai ellenére jelentős korlátja az SEA-nak, hogy ahhoz, hogy a csukló eredő elasztikusságát módosítani tudjuk a benne lévő rugót ki kell szerelnünk és egy megfelelőt kell visszatennünk a helyére.

Az előbbieket fényében, megvizsgáltam annak a lehetőségét, hogy nagysebességű lokális kontroll segítségével az aktuátor természetes dinamikáját meg lehessen változtatani. Pontosabban, hogy megtervezzek és implementáljak egy olyan aktuátort ami képes különböző elasztikus viselkedés emulálására.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: [7].

2.1. Kidolgoztam egy olyan teljesen elektromos aktuátor koncepcióját, amely a series elastic actuatoral szemben - amelyet a mai state-of-the-art dinamikus járó robotokban használnak -, lokális nagy sebességű szoftveres kontroll segítségével képes fizikai rugalmasság megvalósítására, rugó felhasználása nélkül.

Egy újszerű, teljesen elektronikus, a csukló változtatható elasztikusságának emulálási koncepcióját javasoltam bipedál robotokhoz és más alkalmazási területekre (szabadalom beadva). Emulált elasztikus aktuátornak neveztem el a soros elasztikus aktuátor után. Az ötlet alapja egy olyan mechanizmus ami nagyon kis áttétellel rendelkezik, nagy mértékben visszamozgatható és praktikusán nulla holtjátéka van, majd emellé véve egy elektronikus motort nagysebességű lokális kontrollal amivel előállítjuk a kívánt pillanatnyi forgatónyomatékokat, hogy a fizikai rugó viselkedését utánozni tudjuk. A legfontosabb feltétel, hogy a kontroll lokális legyen, hogy a nagy sebességű működést biztosítani lehessen (több mint 20 000 iteráció/másodperc). Ezidáig a tipikus leggyorsabb kontroll az 1000-2000 iteráció/másodperc tartományba esett ami legalább egy nagyságrendel kevesebb. A koncepció alapos vizsgálatához a rendszer részletes modelljét is kidolgoztam beleértve a hibrid léptetőmotor (HSM) modelljét és a kommutálást végző elektronika modelljét is. A motor nem-lineáris dinamikáját linearizáltam pozíció visszacsatoláson keresztül. Az elméleti eredmények alátámasztásához valós hardveres tervezés és implementáció is készült.

Az altézishez kapcsolódó disszertáció fejezet: III.2

2.2. Felhasználva a Hooke és a Kelvin-Voight féle elasztikus modellt bemutattam, hogy az emulált elasztikus aktuátor koncepciója alkalmas lineáris karakterisztikájú fizikai rugalmasság létrehozására, továbbá bemutattam hogy pozitív, de akár negatív csillapítás is megvalósítható vele.

Az EEA koncepciójának a segítségével két lineáris elasztikus viselkedést vizsgáltam. Az egyszerű Hooke és a Kelvin-Voight féle elasztikus modellt implementáltam különböző elasztikusági paraméterek mellett. Az utóbbi modell azért fontos mert a Hooke féle rugalmasság mellett csillapítást is tartalmaz. Az egyenlet rotációs esetre a következőképpen néz ki

$$\tau_{kv} = -k\Delta\theta_s - \eta\frac{d\theta_s}{dt}, \quad (1)$$

ahol τ_{kv} a rugó és a csillapító tag következtében létrejövő forgatónyomaték és η a viszkozitás (N m s / rad) paramétere.

Negatív η választásával, a koncepció túl lép a passzív rendszerek korlátain, negatív csillapítás létrehozásával. A 2.(a) ábra egy szimulációs eredményt ábrázol ahol $k = 44.5$ Nm/rad és $\eta = -1.28 \times 10^{-3}$ N m s / rad.

A szimulációs eredmények validálásához valós hardveres implementáció is készült. Az azonos paraméterekkel történő kísérleti mérés eredménye a 2.(b) ábrán látható ahol jól látható, hogy a mérés jól alátámasztja a szimulációs eredményt.

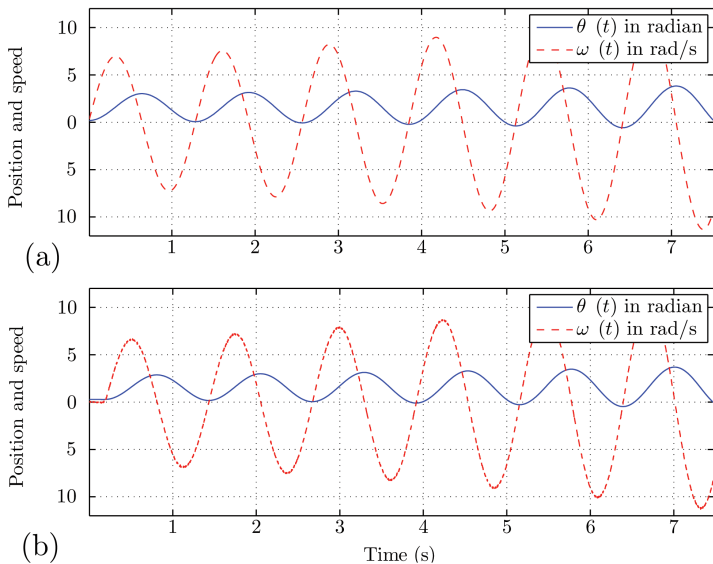


Figure 2: A szimulációs (a) és a kísérleti (b) eredmények összehasonlítása amelyek a rendszer Kelvin-Voight féle elasztikus modell emulálását mutatják $k = 44.5 \text{ Nm/rad}$ és $\eta = -1.28 \times 10^{-3} \text{ N m s / rad}$ paraméterek mellett.

Az altézishez kapcsolódó disszertáció fejezet: III.4

2.3. Az emulált elasztikus aktuátor koncepcióját kiterjesztettem nem-lineáris elasztikus viselkedésre. Egy egy lábú robot megtervezésével és modellezésével, amelyet az Euler-Lagrange módszer szerint végeztem, bemutattam hogy a state-of-the-art rugalmas aktuátorokkal szemben az EEA-val könnyen átkonfigurálható nem-lineáris karakterisztikájú elasztikus viselkedés valósítható meg.

Bevett szokás a lábakat rugókként modellezni [16, 17]. A földetérés alatt a virtuális rugó összenyomódása imitálja a lábak viselkedését ahogy azok a földetérés erejét tompítják. Nyilvánvalóan, nem csak a mi lábunk viselkedése modellezhető rugókkal, hanem a bipedál robotoké is. Ahhoz, hogy egy egyszerű lineáris karakterisztikájú virtuális rugó jöjjön létre, nem-lineáris elasztikusságra van szükség a csuklóknál csakhogy még a state-of-the-art aktuátorok is lineáris karakterisztikára korlátozódnak.

A nem-lineáris rugók emulálásának a vizsgálatához, terveztem és implementáltam egy két szabadsági fokú, alulvezérelt, egy lábú robotot. A robot dinamika egyenletének a felírásához az energia alapú Euler-Lagrange módszert használtam. Ahhoz, hogy lineáris karakterisztikájú virtuális rugót hozzunk létre egy nem-monoton, nem-lineáris elasztikusságot definiáltam

$$\tau_{ns} = -2k_{ns}l^2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\sin\left(\frac{\theta_r}{2}\right) - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right], \quad (2)$$

ahol az $_{ns}$ index a nem-lineáris rugóra utal, $\tau_{ns}(\theta)$ a forgatónyomaték-elfordulás karakterisztika és θ_r nyugalmi szög. A kapott szimulációs eredményeket valós hardveres környezetben kí-

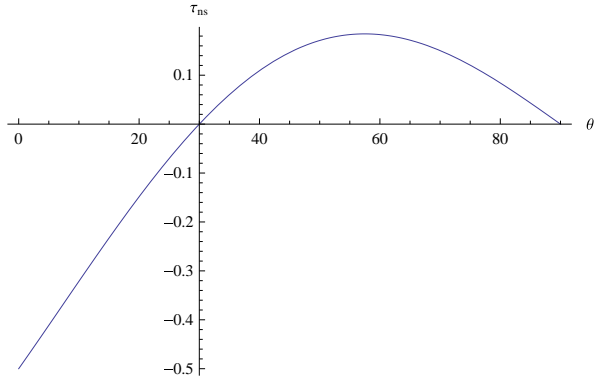


Figure 3: Nem-lineáris forgatónyomaték-elfordulás karakterisztikája ($\tau_{ns}(\theta)$) a csukló elasztikusságának amely a kívánt lineáris karakterisztikájú virtuális rugót hozza létre. ($k_{ns} = 1, l = 1, \theta_r = 45^\circ$).

sérleti mérésekkel igazoltam, ahol az eredmények jól alátámasztották az emulálás működőképességét.

Az altézishez kapcsolódó disszertáció fejezet: III.5

Eredmények alkalmazási területei

A munkám során elkészült algoritmusok és implementációk mindegyike valós alkalmazási területeken felmerülő problémákra ad megoldást.

Az első tézis csoport eredménye remélhetőleg megoldást adhat olyan robotikus csuklók létrehozására nagy szabadsági fok, alacsony előállítási költség és csökkentett holtjáték mellett. Például a 30 vagy annál is több szabadsági fokkal rendelkező humanoid robotok esetében kimondottan előnyös hiszen így több tíz igen drága hulláhhajtás használata válik szükségtelenné. Tehát a bemutatott megoldás ajánlott minden közepes költségvetésű humanoid és járó robot alkalmazás területén.

A második tézis csoport esetében az eredmények fő felhasználási területe a dinamikus robotok. Hiszen egy olyan újfajta tisztán elektromos aktuátor került bemutatásra amely a SEA újszerű alternatívája. Ezért aztán az emulált elasztikus aktuátor minden olyan alkalmazási területen használható ahol az SEA. Például akár a járó, futó és ugró robotokba. Remélhetőleg az EEA használatával a humanoid robotok mozgása még dinamikusabbá és emberszerűbbé válhat. Emellett, a modern ipari manipulátorokban is használható amely a lehetséges alkalmazási területeket az ipari felhasználással is bővíti. Ezek a manipulátorok tovább növelhetik az ember és robot együttműködésének a biztonságát. Emellett az ipar más területein is előnyös lehet az a tulajdonsága, hogy elasztikus viselkedés emulálására képes. Például a szolgáltató iparban vagy az autóiparban tekerőkben, kapcsolókban ahol programozható erő-elmozdulás karakterisztikát valósíthatna meg (pl.:BMW iDrive kezelő felületében).

Köszönetnyilvánítás

Először is, szeretném megköszönni önzetlen támogatását, segítségét és belém vetett hitét témavezetőmnek *Cserey Györgynek*.

Hálás vagyok a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológia Karának és az Interdiszciplináris Műszaki Tudományok Doktori Iskolának, ezeken belül is különösen *Nyékyéné Gaizler Juditnak*, *Roska Tamásnak* és *Szolgay Péternek*, hogy biztosították mindazon feltételeket és eszközöket amik szükségessé voltak a sikeres munkavégzéshez.

Szeretnék köszönetet mondani *Tar Ákosnak*, a már nagyon hosszú ideje tartó közös munkáért és inspiráló beszélgetésekért.

Hálás vagyok a Robotika laborban dolgozó közvetlen kollégáimnak *Sárkány Norbertnek*, *Rák Ádámnak*, *Hóz Norbertnek*, *Jákli Balázsnak* és Gombkötő Ákosnak segítségükért, tanácsaikért és a szakmai beszélgetésekért.

Szeretnék köszönetet mondani továbbá a többi PhD-hallgatónak és barátaimnak segítségükért, különösen *Tisza Dávidnak*, *Vizi Péternek*, *Rudan Jánosnak*, *Tuza Zoltánnak*, *Szolgay Dánielnek*, *Kiss Andrásnak*, *Tornai Gábornak*, *Füredi Lászlónak*, *Kárász Zoltánnak*, *Kovács Andreának*, *Szabó Vilmosnak*, *Tornai Kálmánnak*, *Varga Balázsnak*, *Pilissy Tamásnak*, *Tibold Róbertnek*, *Balogh Ádámnak* és *László Endrének*.

Külön köszönöm a beszélgetéseket és ötleteket *Szederkényi Gábornak*, *Bankó Évának*, *Weiss Bélának*, *Karacs Kristófnak* és *Tihanyi Attilának*.

Köszönöm a végtelen türelmet és segítőkészséget *Vida Tivadarnének*, *Andorján Líviának*, *Haraszi Istvánnének* és *Mikesy Juditnak* és a többi adminisztratív és pénzügyi személyzetnek.

Külön köszönet *Gyöngy Miklósnak* és *Cserey Zsófiának*, akik nagyon sokat segítettek az angol változat megszületésében.

Köszönettel tartozok a Nemzeti Fejlesztési Terv Gazdaság és Versenyképesség Operatív Programjának (GVOP-KMA), az Office of Naval Research-nek (ONR), az amerikai kinttartózkodásomért a University of Notre Dame du Lac és a Hiteles-ember alapítványak anyagi támogatásukért.

Végül, de távolról sem utolsó sorban szeretném megköszönni, és őszinte hálámat kifejezni *Édesanyámnak* és *Édesapámnak*, és családomnak akik minden tőlük telhetőt megtettek azért, hogy a kutatásra tudjak összepontosítani.

Köszönöm szerető jegyesemnek, *Zsófi*nak a kitartását, türelmét, bátorítását a legnehezebb pillanatokban is!

Publikációs lista

A szerző folyóiratbeli publikációi

- [1] B. Soós, Á. Rák, **J. Veres**, and G. Cserey, “Gpu boosted cnn simulator library for graphical flow-based programmability,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009, p. 8, 2009.
- [2] **J. Veres**, G. Cserey, and G. Szederkényi, “Bio-inspired backlash reduction of a low-cost robotic joint using closed-loop-commutated stepper motors,” *Robotica*, vol. FirstView, pp. 1–8, 2013.

A szerző nemzetközi konferencia publikációi

- [3] Á. Tar, **J. Veres** and G. Cserey, “Design and realization of a biped robot using stepper motor driven joints,” in *Mechatronics, 2006 IEEE International Conference on*, pp. 493–498, IEEE, 2006.
- [4] B. Soós, Á. Rák, **J. Veres**, and G. Cserey, “Gpu powered cnn simulator (simcnn) with graphical flow based programmability,” in *Cellular Neural Networks and Their Applications, 2008. CNNA 2008. 11th International Workshop on*, pp. 163–168, IEEE, 2008.

- [5] N. Hóz, **J. Veres**, and G. Cserey, “Hall position encoder-based touch surface,” in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 220–225, IEEE, 2011.
- [6] N. Sárkány, G. Cserey, Á. Tar, and **J. Veres**, “Design of a biomechatronic hand (bmt-h) actuated by the flexor-extensor mechanism,” in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 446–450, IEEE, 2011.

A szerzőhöz kapcsolódó bejelentett szabadalmak

- [7] **J. Veres**, Á. Tar, and G. Cserey, “Hajtómechanizmus.” *Hungarian Patent*, No. P1200012/1.
- [8] Á. Tar, **J. Veres** and G. Cserey, “Érzékelő eszköz.” *Hungarian Patent*, No. P1100633/1.

A t zisz zethez kapcsol d  publik ci k jegyz ke

- [9] G. Pratt and M. Williamson, “Series elastic actuators,” in *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1, pp. 399–406 vol.1, 1995.
- [10] L. M rton and B. Lantos, “Control of mechanical systems with stribek friction and backlash,” *Systems & Control Letters*, vol. 58, no. 2, pp. 141–147, 2009.
- [11] L. M rton, “Adaptive friction compensation in the presence of backlash,” *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 11, no. 1, p. 3, 2009.
- [12] M. Nordin and P. Gutman, “Controlling mechanical systems with backlash—a survey,” *Automatica*, vol. 38, no. 10, pp. 1633–1649, 2002.
- [13] R. Kalantari and S. Foomanr, “Backlash nonlinearity modeling and adaptive controller design for an electromechanical power transmission system,” *Scientia Iranica Transaction B: Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 463–469, 2009.
- [14] R. Merzouki and J. Cadiou, “Estimation of backlash phenomenon in the electromechanical actuator,” *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 8, pp. 973–983, 2005.

- [15] B. J. Jung, J. S. Kong, B. H. Lee, S. M. Ahn, and J. G. Kim, "Backlash compensation for a humanoid robot using disturbance observer," in *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, vol. 3, p. 2142-2147, 2005.
- [16] J. S. Kong, B. J. Jung, B. H. Lee, and J. G. Kim, "Nonlinear motor control using dual feedback controller," in *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*, p. 6, 2006.
- [17] Y. Blum, S. Lipfert, and A. Seyfarth, "Effective leg stiffness in running," *Journal of biomechanics*, vol. 42, no. 14, p. 2400-2405, 2009.
- [18] A. Seyfarth, A. Friedrichs, V. Wank, and R. Blickhan, "Dynamics of the long jump," *Journal of Biomechanics*, vol. 32, no. 1259, p. 1267, 1999.