



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MŰSZAKI MECHNIKAI TANSZÉK

PHD TÉZISFÜZET

Alulaktuált mechanikai rendszerek dinamikai vizsgálata és pályakövetése

Szerző:

BENCSIK László

Témavezető:

Dr. KOVÁCS László

Budapest, 2017. március

Az értekezés előzményei, összefoglalása

A doktori értekezés alulaktuált dinamikai rendszerek modellezésével és pályakövető szabályozásával foglalkozik. Az alulaktuált mechanikai rendszerek olyan rendszerek ahol a szabadsági fokok száma több, mint a független beavatkozók száma.

Az alulaktuált rendszerek a legtöbb esetben bonyolult kinematikájú, sok szabadsági fokú rendszerek. Az úgynevezett differenciálalgebrai egyenletek jól használhatóak az ilyen problémák matematikai modellezésére. Az így modellezett rendszerek stabilitásvizsgálatát nehezíti, hogy a leíráshoz használt koordináták összefüggenek. A dolgozatban bemutatásra került egy olyan módszer amellyel az ilyen típusú, differenciálalgebrai egyenlettel leírt rendszerek sajátérték vizsgálata közvetlenül elvégezhető, és egy adott egyensúlyi helyzet stabilitása megállapítható.

Az alulaktuált rendszerek szabályozásában a legnagyobb problémát a nem szabályozott ún. belső dinamika teljes rendszerre gyakorolt hatása jelenti. Számos esetben ez destabilizáló hatású és ennek következtében a feladat módosítás nélkül nem hajtható végre. A szakirodalomban jelenleg csak olyan módszerek ismeretek, amelyek a szabályozási kimenet intuitív módosításán alapulnak. A dolgozatban bemutatásra került egy stabilitásvizsgálaton alapuló módszer a szabályozási kimenet számítással történő, szisztematikus módosításához. Ez az ún. kevert szervó-kényszerek módszere, ahol a belső dinamika stabilitásának vizsgálata a differenciálalgebrai egyenletek vizsgálatára kifejlesztett módszert használva történik.

Továbbá kidolgozásra került egy új feladatmegosztáson alapuló módszer, amely megfelelő periodikus kapcsoló függvényekkel javítja az alulaktuált robotok pályakövetésének dinamikai tulajdonságait. Ez az ún. periodikusan kapcsolt szervó-kényszerek módszere, amely alkalmazható instabil belső dinamikával rendelkező rendszerek szabályozására is.

A pályakövetési feladatokban a beavatkozók szaturációja ideiglenesen fellépő alulaktuált viselkedésnek tekinthető. A dolgozatban javasolt periodikus szervó-kényszerek módszere hatékonyan csökkenti a pályakövetési hibát és elősegíti a szaturációból való gyorsabb visszatérést.

A dolgozat utolsó fejezete a futás biomechanikai modelljével foglalkozik, amely modell alulaktuáltnak tekinthető. Az emberi futás példáján keresztül kerül bemutatásra, hogy a dolgozatban bemutatott több-test dinamikai modellek hogyan használhatóak biomechanikai problémák analízisében. A közölt részletes analízis különböző futási stílusok energetikai hatékonyságát mutatja be.

1. Tézishez vezető új eredmények

Holonom többtest dinamikai rendszerek nem minimális számú koordinátákkal való modellezése index-3 típusú differenciál algebrai egyenleteket (DAE) eredményez. Ilyen rendszerek stabilitásának vizsgálatakor a geometriai kényszerek miatt olyan sajátértékek is megjelennek, amelyek nem a fizikai rendszerhez tartoznak. Ezekben az esetekben a legelterjedtebb módszer a rendszer modelljének újraparaméterezése, transzformálása minimális számú koordináták felhasználásával. Ezek választása intuitív, nem egyértelmű.

1. Tézis

Jelen tézisben ismertetett módszer közvetlenül a modellezett rendszer újraparaméterezése nélkül, teszi lehetővé dinamikai egyenletek sajátérték vizsgálatát. A módszer lépései a következők:

- Index-1 típusú DAE-t eredményező index redukció végrehajtása.
- Gyorsulásokra vonatkozó kényszeregyenletek egy érzékenységi függvénnyel való kiegészítése.
- Linearizálás a vizsgált egyensúlyi helyzet körül.
- Sajátértékek kiszámítása.
- A nem fizikai sajátértékek érzékenységvizsgálattal történő leválasztása

A javasolt módszer kiterjeszhető digitálisan mintavételezett rendszerekre is. Ebben az esetben a sajátértékek kiszámítása előtt elő kell állítani az egy mintavételezésre érvényes diszkrét megoldást, majd a nem fizikai sajátértékek leválaszthatóak az érzékenységi vizsgálattal. Az érzékenységi paraméterek egy megfelelő megválasztása, ha azok ugyanakkorák, vagy kisebbek, mint a rendszer numerikus szimulációjához jól használható Baumgarte-féle stabilizációs paraméterek.

Kapcsolódó folyóirat publikáció:

L. Bencsik, L.L. Kovács, and A. Zelei. Stabilization of internal dynamics of underactuated systems by periodic servo-constraints. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017. 14 pages, paper id: 1740004.

Egyéb kapcsolódó publikáció:

[5]

2. Tézishez vezető új eredmények

Alulaktuált rendszerek esetében az instabil belső dinamika megakadályozhatja a kiszámított nyomatékok módszerén alapuló pályakövetést. A probléma feloldható az alábbiakban javasolt módszerrel, ami a kevert szervó-kényszerek módszere. A módszer alkalmazhatóságát egy egyszerű daru modell (vízszintesen mozgó felfüggesztésű inga) szimulációja és ugyanehhez a rendszerhez tartozó kísérleti berendezéssel végzett mérések igazolják. A kevert szervó-kényszerek módszere jól alkalmazható az ACROBOTER szerviz robot összetett pályakövetési feladatának szimulációjában is.

2. Tézis

A kevert szervó-kényszerek módszere két különböző szervó-kényszer megfelelő kombinációján alapszik. Jelölje $\hat{\gamma}$ a szabályozó eredeti feladatát, és γ_s módosítsa az eredeti feladatot úgy, hogy ezek lineáris kombinációja $\gamma = \kappa \hat{\gamma} + (1 - \kappa)\gamma_s$ már megvalósítható legyen. Az alkalmazott szabályozási paraméter κ szerepe a stabilizálás és a pályakövetési pontosság megfelelő egyensúlyának biztosítása. A stabilizáló γ_s szervó-kényszereknek elő kell írnia azon koordinátákat, melyek az eredeti feladathoz tartozó belső dinamikát jellemzik.

A dolgozatban vizsgált két példa esetében a κ csatolási tényező stabilitás vizsgálattal lett behangolva. A daru modell esetében a belső dinamika által okozott rezgések leggyorsabb csillapodása $\kappa = 0.6$ mellett érhető el, míg az Acroboter robot esetében ez a $\kappa = 0.8$ értékhez tartozik.

Kapcsolódó folyóirat publikáció:

L.L. Kovács and L. Bencsik. Stability case study of the acroboter underactuated service robot. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(4), 2012. (Article 043004).

Egyéb kapcsolódó publikációk:

[3], [11], [2], [17], [13], [12].

3. Tézishez vezető új eredmények

Potenciálisan instabil belső dinamikával rendelkező alulaktuált rendszerek pályakövető szabályozására egy új periodikus szabályozót javasoltam. A javasolt módszer neve a periodikusan kapcsolt szervó-kényszerek módszere. A módszer felhasználhatósága szimulációkkal lett igazolva a daru modell és az Acroboter robot síkbeli modellje esetén.

3. Tézis

A periodikusan kapcsolt szervó-kényszerek módszere esetén a szabályozó feladatát két különböző szervó-kényszer definiálja, az egyik leírja az eredeti szabályozási feladatot, míg a másik stabilizálja az egyébként instabil belső dinamikát. A periodikus váltást a különböző szabályozási feladatok között az ún. kevert szervó-kényszerek valósítják meg $\gamma = \kappa(t)\hat{\gamma} + (1 - \kappa(t))\gamma_s$, ahol γ_s tartalmazza a stabilizáló szervó-kényszereket, míg $\hat{\gamma}$ jelöli az eredeti szabályozási feladatot. A periodikus $\kappa(t) = \kappa(t + T)$ kapcsoló tag egy szakaszosan konstans függvény, amely nulla vagy egy értéket vehet fel. Ez azt jelenti, hogy egy perióduson belül egy adott ideig a szabályozó célja a pályakövetési feladat pontos megvalósítása, míg a fennmaradó időben a stabilizáló szervó-kényszerek érvényesek.

A pályakövetés hibájának négyzetes középértéke (RMS) 37%-kal csökkent a daru modell esetében, míg az Acroboter robot esetében 50%-os csökkenés volt megfigyelhető, abban az esetben, ha $\kappa(t) = \kappa(t + T)$ periodikus kapcsoló függvényt alkalmazunk a legjobban stabilizáló konstans κ csatolás helyett.

Kapcsolódó folyóirat publikáció:

L. Bencsik, L.L. Kovács, and A. Zelei. Stabilization of internal dynamics of underactuated systems by periodic servo-constraints. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017. 14 pages, paper id: 1740004.

Egyéb kapcsolódó publikációk:

[5], [6].

4. Tézishez vezető új eredmények

A meghajtó motorok nyomatékának szaturációja a pályakövetési feladatok váratlan eseménye, amely a szabályozott rendszert időszakosan alulaktuálttá teszi. A szaturáció dinamikai hatásainak csökkentésére periodikus szabályozó lett javasolva. A szabályozó algoritmikus hangolásához egy a klasszikus robotikai irodalomban definiált manipulálhatósági mérőszámot került bevezetésre. A javasolt módszert összehasonlításra került több az irodalomban már jól elterjedt szaturáció kezelő eljárással egy síkbeli robotkart vizsgálva. A javasolt szabályozó működését a következő tézis ismerteti.

4. Tézis

A következőekben bemutatott szabályozó a meghajtó motorok nyomatékának szaturációja következtében fellépő dinamikai hatásokat csökkenti pályakövetési feladatok esetében. A szaturációs állapot előtt a szabályozó a klasszikus kiszámított nyomatékok módszere alapján működik, míg szaturáció közben az aktív szervó-kényszerek számát csökkentve különböző alacsonyabb dimenziójú $\hat{\gamma}_i$ szervó-kényszerek váltakoznak periodikusan. Az alkalmazott $\gamma_{\text{sat}}(t)$ periodikus szervó-kényszer definíciója a következő

$$\gamma_{\text{sat}} = \sum_{i=1}^N \kappa_i \hat{\gamma}_i, \quad \kappa_i(t) = \kappa_i(t + T),$$

ahol $\kappa_i(t)$ szakaszosan konstans függvény kapcsol a különböző szervó-kényszer készletek között, és $N < \binom{l}{r}$ a különböző $\hat{\gamma}_i$ készletek száma, amelyek rész-halmazai az eredeti $\hat{\gamma}$ szervó-kényszereknek. A periodikus kapcsoló függvény megválasztása a bevezetett manipulálhatósági mérőszám alapján történik, amely az adott pillanatban osztályozza különböző szervó-kényszereket hatásuk és fontosságuk alapján.

Összehasonlítva az irodalomban található jól ismert módszerekkel a pályakövetés hibájának négyzetes középértéke legalább (RMS) 20%-kal javult. A pályakövetés maximális hibája pedig 7%-kal csökkent a legjobban működő vizsgált irodalmi módszerhez képest.

Kapcsolódó folyóirat publikációk:

[1] L. Bencsik and L.L. Kovács. Reduction of the effect of actuator saturation with periodic servo-constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016. published online in October 20, 2016, 10 pages.

[2] A. Zelei, L. Bencsik, and G. Stépán. Handling actuator saturation as underactuation: Case study with acroboter service robot. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 12(3), 2017.

Egyéb kapcsolódó publikáció: [9]

5. Tézishez vezető új eredmények

Az emberi futás vizsgálata esetén a talajra érkezéskor az ütközés intenzitása jellemezhető a kényszerített irányokhoz tartozó kinetikus energia (constrained motion space kinetic energy, vagy röviden CMSKE) értékével, amely energia elveszik a talaj-láb tökéletesen rugalmatlannak tekintett ütközése során. Az irodalomban megtalálható modellek segítségével kimutatható, hogy a lábujjhegyre történő érkezés során az ütközés intenzitása kisebb mint sarokra történő érkezéskor. Ugyanakkor, ezekkel a modellekkel számított CMSKE értékek függetlenek a lábszár szög előjelétől, ami ellentmond annak a gyakorlati tapasztalatoknak, amely szerint a pozitív lábszár szögű talajra érkezés (túllépés vagy angolul overstride) a futás szempontjából energetikailag előnytelen. A különböző futási stílusok elemzésére egy kibővített síkbeli modell lett javasolva, amely egy minimálisan komplex reprezentatív modell, sarokra vagy a lábujjra történő érkezést és a túllépés jelenségét is a gyakorlati megfigyelésekkel összhangban képes modellezni.

5. Tézis

A futás dinamikai vizsgálatára javasolt kibővített modell tartalmazza a lábfejet, a lábszárat, a combot, valamint a nem modellezett testrészeket, amelyet tömegpontként vesz figyelembe. Ezt a modellt alkalmazva számításokban a lábszár szög hatása megegyezik a gyakorlati tapasztalatokkal, hiszen pozitív lábszárszög nagyobb CMSKE értéket eredményez mint a negatív lábszárszög.

Továbbá a javasolt modellel kapott eredmények megegyeznek a korábbi irodalom eredményeivel is, miszerint az ütközés intenzitása kisebb, ha sarok helyett lábujjhegyre érkezünk.

Kapcsolódó folyóirat publikáció:

L. Bencsik and A. Zelei. Effects of human running cadence and experimental validation of the bouncing ball model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89:78–87, 2016.

Egyéb kapcsolódó publikációk:

[14], [15], [7], [8].

Publikációk

- [1] L. Bencsik and L.L. Kovács. Reduction of the effect of actuator saturation with periodic servo-constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016. published online in October 20, 2016, 10 pages.
- [2] L. Bencsik and L.L. Kovács. Stability case study of an underactuated service robot. In *Proceedings of 11th Conference on Dynamical Systems - Theory and Applications (DSTA)*, pages 89–94, December 5-8, 2011, Lodz, Poland.
- [3] L. Bencsik and L.L. Kovács. Alulaktuált robotok kiszámított nyomaték szabályozása szervó kényszerek alkalmazásával. In *Proceedings of XI. Magyar Mechanikai Konferencia pp. 1-6*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, August 29 - September 1, 2011.
- [4] L. Bencsik, L.L. Kovács, and A. Zelei. Stabilization of internal dynamics of underactuated systems by periodic servo-constraints. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017. 14 pages, paper id: 1740004.
- [5] L. Bencsik, L.L. Kovács, and A. Zelei. Stability of underactuated multibody systems subjected to periodic servo constraints. In *Proceedings of Dynamical Systems Theory and Applications (DSTA)*, pages 89–94, Dec. 7-10, 2015, Lodz, Poland.
- [6] L. Bencsik, L.L. Kovács, and A. Zelei. Periodic servo-constraints for stabilizing underactuated multibody systems. In *Proceedings of The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics and The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics*, June 30-July 3, 2014, Busan, Korea. 2 pages.
- [7] L. Bencsik and A. Zelei. Effects of human running cadence and experimental validation of the bouncing ball model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89:78–87, 2016.
- [8] L. Bencsik and A. Zelei. A study on the effect of human running cadence based on the bouncing ball model. In *Proceedings of Dynamical Systems Theory and Applications (DSTA)*, pages 47–57, Dec. 7-10, 2015, Lodz, Poland.

- [9] L. Bencsik, A. Zelei, and L.L. Kovács. Reduction of the effect of actuator saturation with periodic servo-constraints. In *Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*, June 29 - July 2, 2015, Barcelon, Spain. paper id: 246.
- [10] L.L. Kovács and L. Bencsik. Stability case study of the acroboter underactuated service robot. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(4), 2012. (Article 043004).
- [11] L.L. Kovács, L. Bencsik, and J. Kövecses. Dynamic analysis of under-actuated mechanical systems for design optimization and control performance. In *Proceedings of The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics - IMSD2012*, Stuttgart, Germany, May 29 - June 1, 2012.
- [12] L.L. Kovács, J. Kövecses, A. Zelei, L. Bencsik, and G. Stépán. Servo-constraint based computed torque control of underactuated mechanical systems. In *Proceedings of ASME 2011 8th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control*, pages 331–338, August 28–31, 2011, Washington, USA.
- [13] L.L. Kovács, A. Zelei, L. Bencsik, and G. Stépán. The acroboter platform - part 1: Conceptual design and dynamics modeling aspects. In *Proceedings of IUTAM Symposium on Dynamics Modeling and Interaction Control in Virtual and Real Environments - IUTAM Book Series by Springer*, pages 3–10, 7-11 June, 2010, Budapest, Hungary.
- [14] A. Zelei, L. Bencsik, L.L. Kovács, and G. Stépán. Energy efficient walking and running - impact dynamics based on varying geometric constraints. In *Proceedings of 12th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications (DSTA)*, pages 259–270, Lodz, Poland, 2-5, December 2013.
- [15] A. Zelei, L. Bencsik, L.L. Kovács, and G. Stépán. Impact models for walking and running systems - angular moment conservation versus varying geometric constraints. In *Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*, pages 47–48, Zagreb, Croatia, 1-4 July 2013.
- [16] A. Zelei, L. Bencsik, and G. Stépán. Handling actuator saturation as underactuation: Case study with acroboter service robot. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 12(3), 2017.
- [17] A. Zelei, L. Bencsik, G. Stépán, and L.L. Kovács. Dynamics and actuation of the acroboter platform. In *Proceedings of The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics - IMSD2012*, pages 333–334, May 29 - June 1, 2012, Stuttgart, Germany.