



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK

PhD Tézisfüzet

---

GÉPI ÉS EMBERI POZICIONÁLÁSI,  
ÉRINTÉSI MŰVELETEK DINAMIKÁJA

---

*Szerző*  
MAGYAR Bálint

*Témavezető*  
Dr. STÉPÁN Gábor

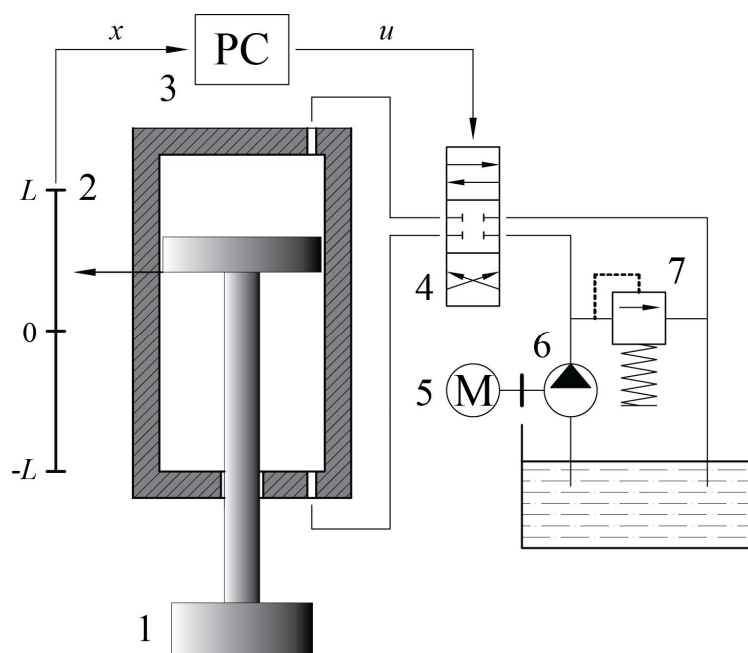
Budapest, 2015. január

---



## Bevezetés

Az értekezés gépi pozíció szabályozás stabilitásával, érintési feladatok idő-optimalizálásával, valamint emberi funkcionális mozgások vizsgálatával foglalkozik. A gépi pozíciószabályozáshoz kapcsolódóan egy hidraulikus munkahenger nem-sima matematikai modellje kerül bemutatásra, amelyen keresztül a pozíciószabályozás stabilitását tárgyalja a disszertáció különböző szelepkarakteristikák esetén. A pozíciószabályozás és erőszabályozás közötti kapcsolat megközelítési és érintési feladatoknál a témája a következő résznek, majd a humán funkcionális mozgások kinematikájának összehasonlító elemzéséhez készült, dinamikus idővetemítésen alapuló algoritmus kerül bemutatásra a harmadik részben.



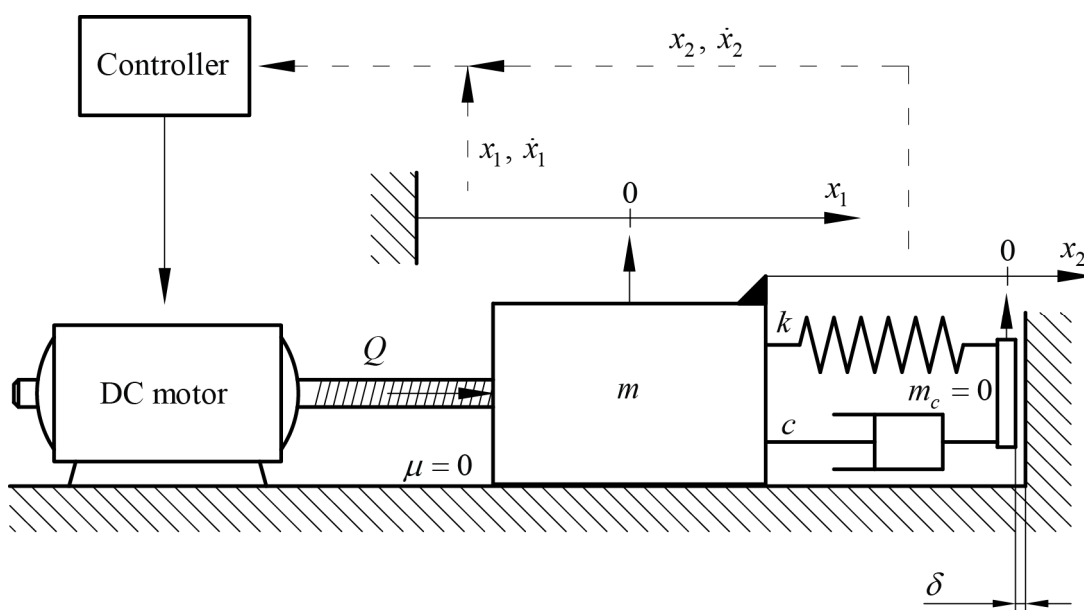
1. ábra, a hidraulikus pozicionáló rendszer. 1: munkahenger, 2: útjeladó, 3: PC a PI szabályzóval, 4: arányos útváltó szelep, 5: elektromotor, 6: fogaskerék szivattyú, 7: nyomáshatároló szelep.

## Hidraulikus pozicionálás szakaszosan lineáris dinamikája

Napjainkban igen elterjedtek a számítógépekkel szabályozott rendszerek, mivel a PC-k ma már mindenki számára elérhetőek és egyszerűen programozhatóak. Ezeknél a rendszereknél azonban új – korábban nem tapasztalt – stabilitásvesztési problémák léptek fel. Az instabilitás egyik oka lehet a digitális eszközöknél az idő mintavételezése. Az instabilitás éppen a gyorsaság és a pontosság növelésekor lép fel, ezért fontos, hogy megtaláljuk a lehető leggyorsabb és legpontosabb, de még stabil működést biztosító szabályzó paramétereit.

## Szabályozási stratégiák érintési feladatokhoz

A robotika és a számítógéppel segített gyártás számos területén találkozhatunk megközelítési és érintési feladatokkal. Tipikusan kutatott probléma például a polírozás, jelentős számú eredmény került publikálásra különböző, a polírozáshoz köthető szabályozási stratégiákkal kapcsolatban, ezek a munkák azonban többnyire a megérintés utáni pozíciószabályozás és erőszabályozás megfelelő összehangoltságát vizsgálják.



2. ábra, a megközelítési és érintési feladat mechanikai modellje.

Ebben a részben egy egyszerű mechanikai modell szabályozása a vizsgálat tárgya, a feladat a lehető legnagyobb sebességgel megközelíteni a megérintendő felületet, elkerülni a visszapattanást, majd a tranziensek lecsengése után az előírt nyomóerőt biztosítani a célfelületen.

## **Humán funkcionális mozgások elemzése**

A értekezés ezen részében bemutatott kutatás célja a komplex humán funkcionális mozgások vizsgálatához, összehasonlító elemzéséhez szükséges algoritmus fejlesztése, a strokebeteg-rehabilitációhoz kapcsolódóan. A mozgásminta elemző szoftver alapját az úgynevezett dinamikus idővetemítés algoritmus adta (Dynamic Time Warping, a továbbiakban DTW). A DTW-t eredetileg az automatizált beszédfelismerés támogatására fejlesztették, azonban a DTW időillesztési algoritmusát a biomechanika számos területe alkalmazza (járás vizsgálat, Parkinson-kór rehabilitáció, stroke-rehabilitáció). A kifejlesztett algoritmus két időalapú jelsort hasonlít össze, amelyek a váll, könyök és ujjak anatómiai szögeinek időbeli változását tartalmazzák.

## **Tézisek**

### **1. Tézis**

Egyszerűsített mechanikai modellt állítottam fel meredek karakterisztikájú fogaskerék szivattyúval ellátott, PI pozíciószabályozású hidraulikus munkahengerekre. Meghatároztam a lineáris matematikai modellt, és ennek alapján kiszámoltam a (P, I) szabályozási paraméterek síkján a stabilitási tartományokat határoló görbékét. Az analitikusan kiszámolt stabilitási határokat egy megfelelő kísérleti berendezésen mérésekkel is igazoltam. A mérés és a számítási eredmények között tapasztalt kis mértékű eltérések alapján a matematikai modellt nem-sima szelepkarakterisztikákkal bővítettem.

---

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [1] és [5].

## 2. Tézis

A hidraulikus pozicionáló rendszerben aszimmetrikus karakterisztikát azonosítottam, amelyek laboratóriumi kísérletek során is megfigyelhetők. A jelenség oka a szeleptányérok eltérő felületei. Numerikus módszerekkel feltérképeztem ezen nemlinearitás stabilitásra gyakorolt hatását, és kimutattam, hogy a nem-sima dinamikai rendszer egy olyan speciális bifurkáción megy keresztül stabilitásvesztéskor, amit nem lehet hagyományos linearizálási technikával kezelni. A szakaszonként lineáris rendszer stabilitási határait analitikusan is meghatároztam. Bebizonyítottam, hogy például a nem-sima bifurkációknál keletkező 3-periódusú megoldások speciális stabilitási határai

$$\det(\Phi_1\Phi_1\Phi_2 - \mathbf{I}) = 0 \text{ és } \det(\Phi_1\Phi_2\Phi_2 - \mathbf{I}) = 0,$$

ahol  $\Phi_1$  és  $\Phi_2$  lineáris leképezések a szakaszonként lineáris rendszer két különböző állapotához tartoznak, és  $\mathbf{I}$  az egységmátrixot jelöli. Az  $n$ -periódusú pályák esetén az ilyen stabilitási határok kombinatorikus robbanáshoz vezetnek, ahogy  $n$  tart végtelenhez. Ez azt jelenti, hogy végtelen sok fraktálszerű stabilitási határ jelentkezik, melyek létezését a szimulációs eredmények is igazolják

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [2] és [6].

## 3. Tézis

Feltérképeztem hidraulikus pozicionáló rendszerekben a szabályozó szelep holtjátékának hatását a globális dinamikára. A pozicionáló rendszer dinamikáját az időkésés és a holtjáték miatt szakaszosan lineáris diszkrét matematikai modellel írtam le, amely 9 különböző lineáris dinamikával jellemezhető. Bizonyítottam, hogy a nem-sima rendszerben lévő invariáns halmaz adott szabályozó paraméterek esetén örökli a holtjáték nélküli, lineáris rendszer egyensúlyi helyzetének

---

stabilitását, és ez az egyensúlyi helyzet része az invariáns halmaznak. Periodikus és kváziperiodikus pályákat azonosítottam a nem-sima dinamikai rendszerben abban az esetben, amikor a szabályozási paraméterek a holtjáték nélküli rendszer stabilitási határára illeszkednek. Bemutattam továbbá, hogy a szakaszosan sima dinamikai rendszer állapotmátrixai függetlenek a holtjáték nagyságától, ahogyan a periodikus és kváziperiodikus pályák stabilitása szintén független ettől. Ezen az úton beláttam, hogy a lineáris, holtjáték nélküli dinamikai rendszer stabilitási határai a nem-sima, holtjátékos rendszer praktikus értelemben vett globális stabilitási határait egyaránt megadják.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: [1].

#### **4. Tézis**

A robotika és a számítógéppel segített gyártás számos területén jelentkezik olyan megközelítési és érintési feladat, ahol nagy merevség és alacsony csillapítás esetén a megközelítés és érintés teljes idejét tekintve a megközelítési rész adja a meghatározó hányadot. Ezt az esetet modelleztem, és meghatároztam azt a bang-bang szabályozáson alapuló időoptimális stratégiát, amelynél az érintés után elkerülhető az érintkező felületek akár csak pillanatnyi elválása. Bizonyítottam, hogy a legnagyobb megközelítési sebesség négylépéses stratégiával érhető el. Ebben az esetben azonban a szakaszosan lineáris rendszer kapcsolófelületét érinti a trajektória még az előírt érintkezési erő elérése előtt, ami zajos pozíciómérés, bizonytalan rendszerparaméterek esetén nem kívánt ütközésekhez vezethet. Bemutattam, hogy ha háromlépéses stratégiát alkalmazunk, és egy differenciális szabályozót illesztünk a harmadik lépés után, mind a zaj, mind a paraméterbizonytalanságok hatását ki tudjuk küszöbölni. Szimulációs eredményekkel bizonyítottam a megvalósított módszer robusztusságát.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [3] és [8].

---

## 5. Tézis

A dinamikus idővetemítés (Dynamic Time Warping, továbbiakban: DTW) algoritmust implementáltam emberi funkcionális mozgások elemzéséhez. Egy post-stroke beteg rehabilitációs projektben ismertem fel az igényt olyan mozgáselemző algoritmusra, ami különböző, kontrol és hemiparetikus személyek által végrehajtott, a mindennapi élethez szükséges funkcionális mozgásokat (Activity of Daily Living, továbbiakban: ADL) hasonlít össze.

A mozgáselemző algoritmust elkészítettem, és összehasonlítottam a rehabilitációs projektben mért, különböző személyek által megvalósított ADL trajektóriákat. Meghatároztam a DTW algoritmus függvényeiben szereplő azon paraméterértékeket, amelynél ábrázolva az összehasonlítás eredményeként kapott DTW távolságokat két klaszter alakul ki. Az egyik klaszter a hemiparetikus személyek paretikus oldalával végrehajtott ADL-eit, a másik klaszter a kontrol személyek mindkét oldali és a hemiparetikus személyek egészséges oldali ADL-eit tartalmazza. Bemutattam, hogy az ismertetett eljárás révén lehetségessé válik rehabilitációban résztvevő személyek ADL teljesítményeinek objektív klasszifikálása, ezzel elkerülve az emberi megfigyelés szubjektivitását.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [4], [7] és [9].

---



---

## Publikációk

### Folyóiratcikkek

- [1] Magyar B, Hős C, Stépán G, Influence of control valve delay and dead zone on the stability of a simple hydraulic positioning system, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2010, Article ID: 349489, 15 pages, doi: 10.1155/2010/349489. (IF = 1.082, független hivatkozások: 7)
- [2] Magyar B, Stépán G, Hidraulikus pozicionálás szakaszosan lineáris dinamikája, *GÉP folyóirat*, nyomdában, várható megjelenés: 2015.
- [3] Magyar B, Stépán G, Time-optimal computed-torque control in contact transitions, *Periodica Polytechnica - Mechanical Engineering* 56:(1) pp. 43-47. (2012).
- [4] Magyar B, Stépán G, Chen I-M, Dynamic time warping analysis in post-stroke rehabilitation, *Biomechanica Hungarica*, nyomdában, várható megjelenés: 2015, 7(2):47–54.

### Konferenciakiadványban megjelent cikkek

- [5] Magyar B, Hős C, Stépán G, Stability Measurement of a digitally controlled hydraulic positioning system, *Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering*, 2010, Budapest, Hungary.
  - [6] Magyar B, Stépán G, Exploring global stability in a nonsmooth dynamical model of hydraulic cylinders, *ESMC-2012 - 8th European Solid Mechanics Conference*. pp. 101-102, Graz, Ausztria.
  - [7] Magyar B, Stépán G, Jurák M, Gelányi L, Fazekas G, Causo A, Chen I-M, Application of dynamic time warping in the analysis of human functional movements, *The 4th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom'13): Chapters of the Future Internet Science and Engineering*, pp. 883–884, Budapest, Hungary.
-

**Egyéb konferenciák**

- [8] Magyar B, Stépán G, Szabályozási stratégiák érintési feladatokhoz, *In Attila B, Edgár B and Sándor S, editors, XI. Magyar Mechanikai Konferencia*, p 74, Miskolc Egyetemváros, Hungary.
- [9] Magyar B, Stépán G, Jurák M, Gelányi L, Fazekas G, Causo A, Chen I-M, Dinamikus idővetemítésen alapuló funkcionális mozgáselemző szoftver fejlesztése, *Orvosi Rehabilitáció és Fizikális Medicina Magyarországi Társasága XXXII. Vándorgyűlése*, Miskolc, Hungary, 2013.
-