

# Emberi egyensúlyozó szabályozás identifikációja szimuláció és kísérleti elemzés segítségével

## Identification of the model of human balancing through simulation and experimental investigation

NAGY Dalma J.<sup>1</sup>, BENCSIK László<sup>2,3</sup>, INSPERGER Tamás<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Műszaki Mechanikai Tanszék, Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5., Tel.: +36 1 463 1369, dalma.nagy@mm.bme.hu, insperger@mm.bme.hu

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Emberi Egyensúlyozás Kutatócsoport, Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5., Tel.: +36 1 463-1369, bencsik@mm.bme.hu

<sup>3</sup> MTA-BME Gépek és Járűművek Dinamikája Kutatócsoport, Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.

### Abstract

*Understanding the control process during human balancing has significant importance and the results could be utilised e.g. in early therapeutic motor control development of children. Investigation of simple balancing tasks can help us to assess the human controller. The present study focuses on stick balancing on the fingertip. The mechanical model is developed using a time-delayed, intermittent, position, velocity and acceleration feedback controller, thus, the governing equation is a neutral delayed differential equation. The role of the acceleration feedback is investigated by applying cepstral analysis on simulation and measured data.*

### Összefoglaló

*Az emberi egyensúlyozás során lejátszódó folyamatok megértése kiemelt fontosságú, az eredményeket többek között a gyermekek korai mozgásfejlésében fel lehet használni. Egyszerűen modellezhető egyensúlyozási feladatok vizsgálata közelebb vihet minket az agyi szabályozás megértéséhez. Jelen kutatás a rűdegyensúlyozást vizsgálja. Mechanikai modellt állítunk fel időkésleltetett, szakaszos, pozíció, sebesség és gyorsulás visszacsatoló szabályozót alkalmazva, így a leíró mozgásegyenlet egy neutrális késleltetett differenciálegyenlet. Kepstrális analízissel vizsgáljuk a gyorsulás visszacsatolásának szerepét mind szimulációs, mind mérési adatok felhasználásával.*

### Kulcsszavak

Egyensúlyozás, reakció késés, szakaszos szabályzás, kepstrum, neutrális késleltetett differenciálegyenlet

## 1. BEVEZETÉS

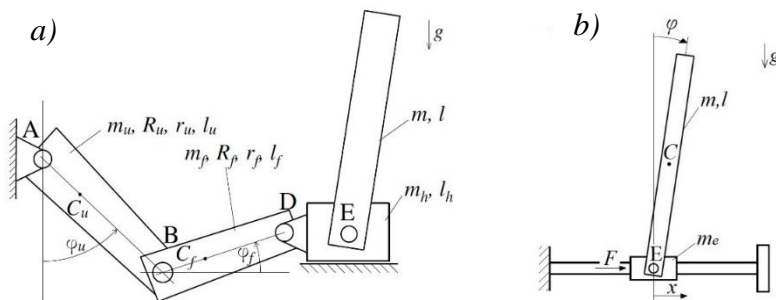
Az emberi egyensúlyozás során lejátszódó neurológiai folyamatokat gyakran modellezik úgy, mint egy számítógép által irányított folyamatot. Érzékszerveink segítségével felmérjük környezetünket, az információt a neurális szervrendszer továbbítja az agyba, amely beavatkozásra ösztönözi az izomzatot. Míg egy számítógépes irányítás esetén a szabályozást a mérnökök tervezik meg, az emberi agy pontos szabályozó mechanizmusa nem ismert. Egyszerűen modellezhető egyensúlyozási feladatok vizsgálata – például ujjhegyen való rűdegyensúlyozás – segíthet az agyi szabályozás megértésében.

A szakirodalomban megtalálható számos modell a szabályozó működésének leírására: PD (arányos - deriváló) szabályzó [1], PID szabályzó [2], szakaszos szabályzás [3]. Jelen kutatás során feltételezzük, hogy az ember a pozíció, sebesség és gyorsulás adatokat méri és csatolja vissza a szabályozó körben. A szabályozó időkésleltetve működik az ember neurális szervrendszerének sajátosságai miatt (reakció késés). Az érzékelési küszöbértéket is

figyelembe véve a szabályozót szakaszos, időkésleltetett PDA - pozíció, sebesség és gyorsulás visszacsatoló szabályozónak feltételezzük. A kutatás célja a feltételezett PDA szabályozó igazolása szimulált és mért időjel kepsztrális analízisének segítségével.

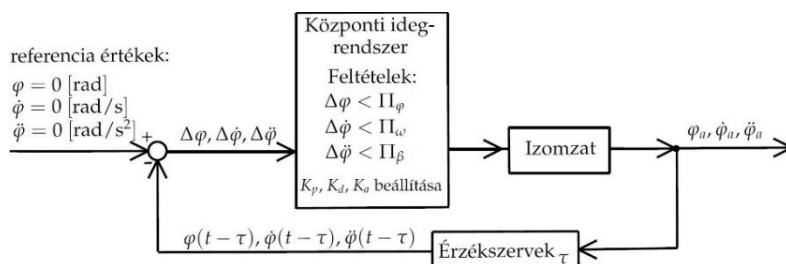
## 2. A RÚDEGYENSÚLYOZÁS MECHANIKAI MODELLEZÉSE

A rúdegyensúlyozást az anterior-posterior [4] síkban modellezzük a kéz függőleges mozgását elhanyagolva. A felkar, alkar, kéz és rúd mechanikai modelljét mutatja az 1.a ábra. A felkar, alkar és kéz tehetetlenségét az 1.b ábrán látható  $m_e$  egyenértékű tömegű kocsival modellezzük, mely tömeget a kinetikus energia ekvivalencia alapján számítunk ki.



1. ábra

a) Rúdegyensúlyozás mechanikai modellje. b) Redukált mechanikai modell.



2. ábra

A szabályozási kör blokk diagramja.

A szabályozási kör blokk diagramját mutatja a 2. ábra. A referencia jelek mind nullával egyenlők, hiszen a cél a rúd függőleges helyzetben való stabilizálása. Az érzékszervektől érkező információkat (a rúd szög, szögsebesség és szöggyorsulás értéke) az agy, mint szabályozó összehasonlítja a referencia értékekkel, és annak függvényében, hogy a különbség milyen viszonyban van az érzékelési küszöbvel, behangolja a szabályozást. Az inga szögét leíró mozgásegyenlet PDA szabályozót alkalmazva az alábbi:

$$\ddot{\varphi} = \frac{6mgl(m+m_e)-3m^2l^2\dot{\varphi}^2\cos\varphi}{4ml^2(m+m_e)-3m^2l^2\cos^2\varphi} \sin\varphi - \frac{6ml\cos\varphi(K_p\varphi(t-\tau)+K_d\dot{\varphi}(t-\tau)+K_a\ddot{\varphi}(t-\tau))}{4ml^2(m+m_e)-3m^2l^2\cos^2\varphi}, \quad (1)$$

ahol  $m$  és  $l$  az inga tömege és hossza,  $g$  a gravitációs gyorsulás,  $\tau$  az időkéésés.  $K_p$  az arányos,  $K_d$  a deriváló és  $K_a$  a gyorsulás visszacsatoló tagok. Ahhoz, hogy stabil megoldást kapjunk, a szabályozó értékeket be kell hangolni, azaz szükség van az egyenlet stabilitási diagramjainak meghatározására. Ehhez a D-szeparáció [5] módszerét használjuk.

## 3. ÉRZÉKELÉS KÜSZÖBÉRTÉKEK MEGHATÁROZÁSA

A szabályozásban visszacsatolt értékek az ember fiziológiai sajátosságai miatt érzékelési küszöbértékkel terheltek, azaz az ingerületnek el kell érnie bizonyos értéket ahhoz, hogy a szervezet érzéklni tudja azt. A gyakorlatban a tapasztalati küszöbértéket mérések segítségével határozzák meg, mely során azt az értéket tekintik, amely 50%-ban helyesen detektálásra kerül az emberek által. [6]

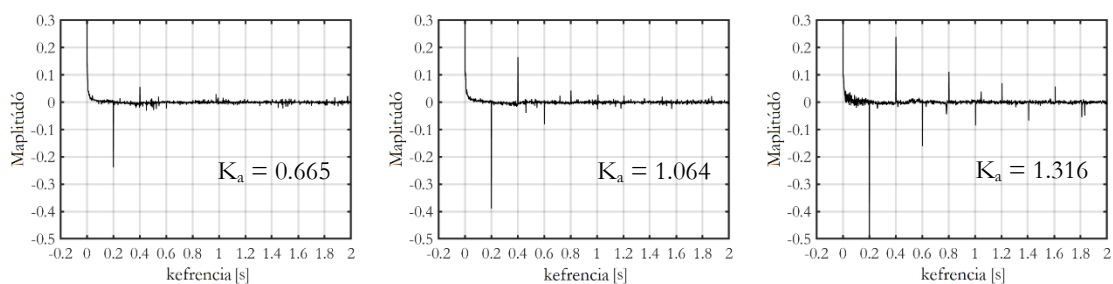
A szimulációk elvégzéséhez mérések segítségével küszöbértéket határoztunk meg a rúd szögére és szögsebességére vonatkozóan. A szög küszöbérték becslése azon a megfigyelésen alapszik, hogy rúdegyensúlyozás során a rúd szögének mért időjelében szabálytalan időnként szabálytalan maximum értékek jelennek meg. A feltételezések szerint ezek a maximumok annak a folyamatnak a végét jelzik, hogy a rúd a szög küszöbértéket elhagyva szabadon esik mindaddig, ameddig az ember a reakció késés idejének eltelte után ezt a folyamatot vissza nem fordítja. A maximum értékek minimumát ablakoló függvényvel megkeresve, majd leosztva egy a felállított mechanikai modell alapján számolt faktoriala meghatározható a szög érzékelési küszöbértéke. 7 személlyel (személyenként 9 rúddal) végzett mérések alapján ez az érték  $2.7^\circ$ .

A sebesség küszöbérték meghatározásához külön kísérletet végeztünk. A személyeknek egy animációt mutattunk, amelyen egy piros és egy kék színű vonal futott végig a képernyőn, és megkértük őket, hogy ítéljék meg, melyik vonalat látják gyorsabbnak. A vonalak sebességkülönbségét százalékban megadva definiáltuk, és a sebességek véletlenszerűen lettek az egyes vonalhoz rendelve. Személyenként 12-szer futtattuk az animációt, 6 sebességeltérést definiálva (0%, 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%, 2%). A tapasztalati küszöbérték a 0.5%-os különbségnek adódott. A vonal tényleges sebességének 0.5%-át leosztva a rúd hosszával számítható a szögsebesség küszöbérték, feltételezve, hogy a személy a rúd felső pontjára koncentrál rúdegyensúlyozáskor. 7 személlyel végzett mérések alapján ez az érték  $0.0215\%/s$ .

#### 4. KEPSTRÁLIS ANALÍZIS SZIMULÁLT ÉS MÉRT IDŐJELEN

A kepstrum a jelfeldolgozásban használt mennyiség, amelyet az időjel Fourier transzformált logaritmusának inverz Fourier transzformációjával számíthatunk. Alkalmazzák beszédelemzésre, a gépészetben pedig fogaskerekek, csapágyak károsodásának detektálására használják. [7]

Az (1) egyenlet egy neutrális késleltetett differenciálegyenlet, mert az időkésés a legmagasabb rendű deriváltban is megjelenik. Időkésleltetett neutrális rendszer frekvenciaválasz függvénye megváltozik: véges sok csúcs helyett végtelen sok, egymástól egyenlő intervallumra található csúcsot tartalmaz. [8] A frekvencia válasz függvény a kimenő és bemenő jel Fourier transzformáltjának hányadosaként számítható, így a kimenő jel, azaz a megoldás Fourier transzformáltja is végtelen sok csúcsot tartalmaz NDDE esetében. A kepstrum segítségével kiválogathatjuk a Fourier transzformáltból a periodikus összetevőket. A fentiek alapján a kepstrum alkalmas lehet a PDA szabályozó validálására. A kepstrum ezen tulajdonságát a modell segítségével végzett numerikus szimulációkkal teszteljük. A szimulációk során a gyorsulás visszacsatoló tag értékének kepstrumra gyakorolt hatását vizsgáljuk, ezt mutatja be a 3. ábra. Az ábra alapján elmondható, hogy 0.2 s kefrencia értéknél csúcsok jelentek meg a kepstrumban, ez a szimuláció során használt időkésés értéke. A csúcsok a gyorsulás visszacsatoló tag növelésével egyre nőnek.

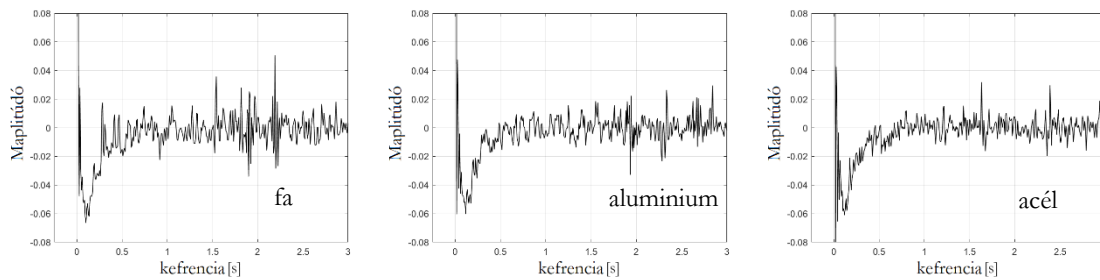


3. ábra

*Szimulációs eredmény: a gyorsulás visszacsatoló tag értékének hatása a szöggyorsulás kepstrumára.*

A szimulációs eredményeket mérési eredményekkel hasonlítjuk össze. A mérések során a vizsgálati személyeket arra próbáltuk ösztönözni, hogy különböző értékű gyorsulás visszacsatoló tagot használjanak azáltal, hogy három eltérő tömegű, de megegyező méretű rudat egyensúlyoznak egymás után. A rudak anyagai fa, alumínium és acél, hosszuk egységesen 0.8 m. A szimulációk alapján azt várjuk, hogy a rúd tömegének növelése megjelenik a kepstrumban. A mérések során a rúd mozgását OptiTrack<sup>®</sup> marker alapú mozgáselemző rendszerrel rögzítettük, ahol a mintavételezési frekvencia 120 Hz, a markerek követési hibája maximálisan 0.2 mm. A rögzített adatokból meghatároztuk a rúd dőlésszögének időbeni változását, és annak kepstrumát.

A 4. ábra mutatja egy személy esetén a rúd mért szöggyorsulásának cepstrumát. Látható, hogy a tömeg növelésével a cepstrumban található csúcsok egyre csökkennek. A 7 személlyel, személyenként 3 különböző színű és 3 különböző tömegű rúddal végzett mérések közül a várt tendencia nem mutatkozik meg minden esetben, így nehéz egyértelmű konklúziót megállapítani.



4. ábra

A rúd tömegének hatása a mért szöggyorsulás cepstrumára, a rúd anyaga az ábrán feltüntetve.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során az emberi rúdegyensúlyozást vizsgáltuk mind kísérletekkel, mind numerikus szimulációval. Felállítottuk a rúdegyensúlyozás egyszerűsített mechanikai modelljét, ahol a rúd dőlésszögét a kéz által kifejtett erővel szabályoztuk, mely erőt időkéleltetett, szakaszos PDA szabályozóval modelleztünk. Méréseket hajtottunk végre a rúd szög és szögsebesség érzékelési küszöbértékének meghatározására, és az értékeket felhasználtuk a numerikus szimulációk elvégzéséhez. A numerikus szimulációk alapján vizsgáltuk a gyorsulás visszacsatoló értékének hatását az időjel cepstrumára, mely során megfigyeltük, hogy a tag növelése a cepstrum csúcsainak növekedését eredményezi. A szimulációs eredményeket mérésekből kapott időjel cepstrális analízisével vetettük össze. A mért adatok cepstruma alapján nem vonható le egyértelmű következtetés a PDA szabályozó helyességére vonatkozóan. Ennek oka lehet, hogy az egyes személyek eltérő módon választják ki a szabályzást, illetve a tanulási folyamat, gyakorlottság is nagyban befolyásolja az egyensúlyozó teljesítményt. A személyek arról számoltak be, hogy a fa rudakat nagyon könnyűnek találják, így nehezebben egyensúlyozzák. További mérések elvégzésére van szükség ahhoz, hogy a feltételezett PDA szabályozót igazolni tudjuk cepstrális analízis segítségével.



AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÚNKP-18-2 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT. A TANULMÁNY ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ KUTATÁST AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÁLTAL MEGHIRDETETT FELSŐOKTATÁSI INTÉZMÉNYI KIVÁLÓSÁGI PROGRAM TÁMOGATTA A BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM BIOTECHNOLÓGIA (BME FIKP-BIO) TÉMATERÜLETI PROGRAMJA KERETÉBEN.

- [1] T. Insperger, J. Milton, R. Meyer, G. Stépán. Control at stability's edge minimizes energetic costs: expert stick balancing. *Journal of the Royal Society Interface* 13(119), 2016
- [2] K. Hidenori, Y. Jiang. A PID model for human balance keeping. *IEEE Control Systems Magazine* 26(6), 2006
- [3] J. L. Cabrera, J. G. Milton. On-off intermittency in a human balancing task. *Physical Rev. Letters* 89(15), 2002
- [4] M. Nordin, V.H. Frankel. *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. Lea & Febiger, Philadelphia, USA, 1989
- [5] J. I. Neimark. D-subdivision and spaces of quasi-polynomials (orosz nyelven). *Prikl Mat Mekh* 13, pp. 349-380, 1949
- [6] H. T. Lawless, H. Heymann. *Sensory evaluation of food. Principles and practices*. Springer, NY USA, 1999.
- [7] H. Konstantin-Hansen, H. Herlufsen. Envelope and cepstrum analyses for machinery fault detection. *Sound and Vibration*, pp.10:12, 2010 May
- [8] J. Xu, Y. Sun, H. Song. Time-delayed identification for linear controlled systems. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 3(6), 2013