

Egyensúlyozó deszkán való egyensúlyozási képességek modellezése a sagittalis síkban

Modelling of balancing abilities on balance board in the sagittal plane

MOLNÁR Csenge A., ZELEI Ambrus, INSPERGER Tamás

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék
MTA-BME Lendület Emberi Egyensúlyozás Kutatócsoport
molnarcsege@gmail.com, zelei@mm.bme.hu, insperger@mm.bme.hu*

Abstract

Nowadays examination of human balancing is becoming more and more important. Several theoretical models can be found in the literature about the mechanism of human brain control. In this work, we modelled the neural system as a PD controller with a reaction time delay. Balancing of human subjects on a balance board was recorded by a camera. The balancing process was analyzed by comparing the experimental result to the theoretical predictions. According to the comparison, the reaction time delay for this balancing task is estimated to be between 0.05s and 0.1s.

Összefoglaló

Napjainkban egyre fontosabbá válik az emberi egyensúlyozás vizsgálata. A szakirodalomban több elméleti modellt találhatunk az emberi agy szabályozási folyamatának leírására. Cikkünkben figyelembe vettük az ember neurális rendszeréből adódó időkésést, időkésleltetett PD szabályzóval modelleztük az agyban lejátszódó folyamatot. Felvételeket készítettünk egyes személyek egyensúlyozásáról, a számított eredményeket ezekkel a mérési adatokkal hasonlítottuk össze, amely szerint a reakcióidő 0.05s és 0.1s közötti értékkel becsülhető.

Kulcsszavak

egyensúly, egyensúlyozó deszka, időkésés, stabilitás, stabilizálhatóság

1. PROBLÉMAFELVETÉS

1.1. Egyensúlyozás folyamata

Napjainkban egyre fontosabbá válik az egyensúlyozás vizsgálata, mert egyre több baleset köthető az egyensúlyvesztéshez, főként az idős emberek körében. Emellett az emberi egyensúlyozás elméleti és kísérleti vizsgálatával megismerhető az agy által használt szabályozási folyamat.

Az emberi egyensúlyozás mechanikai értelemben az emberi test egy instabil egyensúlyi helyzete körül való stabilizálását jelenti, amelyet az agy végez. A receptorok által szolgáltatott információ beérkezése és az agy által előírt beavatkozás megvalósulása között idő telik el, tehát ha matematikailag modellezzük az agyban lejátszódó folyamatot, egy késleltetett rendszert kapunk.

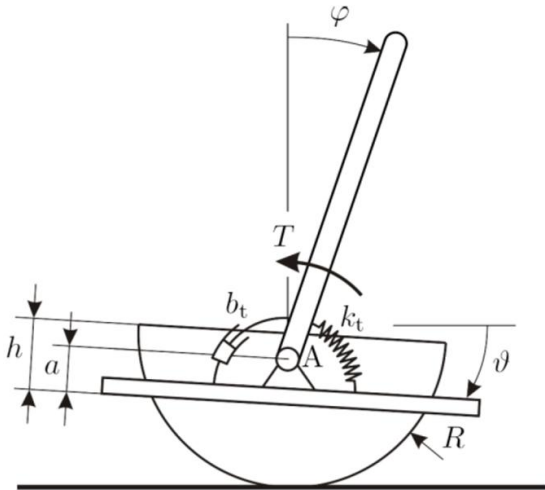
Az emberi egyensúlyozás vizsgálatakor az egyik leggyakrabban felmerülő probléma az, hogy az agy a receptoroktól kapott információk alapján hogyan állapítja meg az izomzatnak adott utasítást. A biomechanika több évtizede foglalkozik ezzel a kérdéssel [1].

1.2. Mechanikai modell

Cikkünkben az 1. ábrán látható két szabadsági fokú modellen keresztül vizsgáltuk az egyensúlyozó deszkán történő emberi egyensúlyozást a sagittalis síkban. Az egyensúlyozó személyt homogén rúddal, a boka körüli izmokat egy torziós merevséggel (k_t), illetve egy viszkózus csillapítással (b_t) modelleztük. Az egyensúlyozó személy reakcióidejét konstans időkéséssel (τ) vettük figyelembe, illetve feltételeztük, hogy az agy az egyensúlyozó személy és deszka környezethez viszonyított dőlésszögével és dőlési sebességével arányos beavatkozásra készíti a boka körüli

izmokat. Ennek következtében az emberi agyat időkésleltetett PD szabályzóval modelleztük. A rendszer két szabadsági foka az emberi test dőlésszöge (φ), illetve az egyensúlyozó deszka dőlésszöge (ϑ) a környezethez viszonyítva, T jelöli az ábrán a bokában ébredő szabályzó nyomatókat.

A torziós merevséget a szakirodalom alapján $k_t \approx 0.8m_hgl/2$ értékkel közelítettük [3], ahol l az egyensúlyozó személy magassága, a viszkózus csillapítást pedig zérusnak tekintettük.



1-2. ábra

A mechanikai modell és az egyensúlyozó deszka

A rendszer mozgásegyenlete az alábbi alakot ölti:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{S}\mathbf{q}(t) = \mathbf{P}\mathbf{q}(t - \tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t - \tau), \quad (1)$$

ahol $\mathbf{M}$ a tömegmátrix, $\mathbf{K}$ a csillapítási mátrix, $\mathbf{S}$ a merevségi mátrix, $\mathbf{q} = (\varphi, \vartheta)^T$ az általános koordinátákat tartalmazó vektor, $\mathbf{P}$ és $\mathbf{D}$ pedig a szabályzó-paramétereket tartalmazó mátrixok. Látható, hogy a mozgásegyenlet jobb oldalán megjelenik a beavatkozást késleltető reakcióidő.

Egyensúlyozáskor a függőleges egyensúlyi helyzettől mért kitérések kicsik, tehát a mozgásegyenlet linearizálható. Lineáris késleltetett rendszerek stabilitásvizsgálatának lehetséges módszerei a D-szeparáció, illetve a szemidiszkretizáció [2].

1.3. Egyensúlyozó deszka

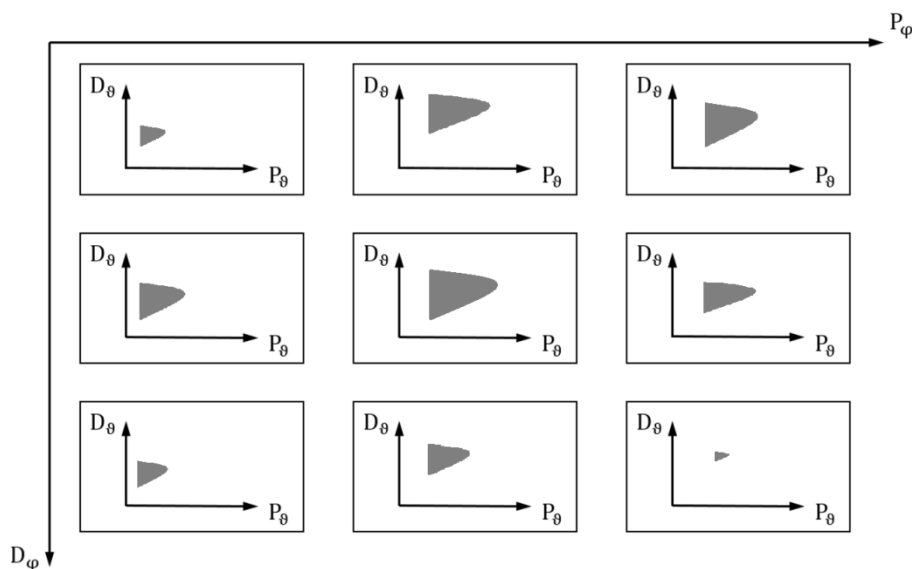
Az elméleti modellben a 2. ábrán látható egyensúlyozó deszka geometriáját használtuk. A konstrukció lehetővé teszi különböző sugarú kerek (R) felszerelését (5, 10, 15, 20 és 25 cm), illetve a lap süllyesztésének (h) változtatását, minden egyes kerék esetén 2.5 cm-enként.

Feltételezhető, hogy minden egyes keréksugar-lapsüllyesztés kombináció esetén létezik egy kritikus időkésés, amely felett nem léteznek olyan szabályzó paraméterek, amelyekre a rendszert leíró egyenletek stabilak lennének.

Az egyensúlyozó deszka keréksugar és lapsüllyesztési lehetőségeinek minden egyes értékpárjára megkerestük ezt a kritikus időkésést, amelyet az értékpárokhoz hozzárendelve, majd az értékpárok síkja fölött ábrázolva egy felületet kapunk, amelynek szintvonalakkal megjelenített ábrázolását stabilizálhatósági diagramnak nevezzük.

2. STABILITÁSVIZSGÁLAT

A stabilitásvizsgálatot a szemidiszkretizációval végeztük el. Egy adott keréksugar-lapsüllyesztés kombináció esetén egy kicsi, rögzített időkésés értékből indulva először megkerestük azokat a szabályzó paramétertartományokat, amelyekre a leíró egyenletek stabilak, tehát kirajzoltattuk a stabil paramétertartományokat. Ezután növeltük az időkésés értékét addig, amíg eltűntek a stabil tartományok. Ha szükséges volt, változtattunk a szabályzó-paraméter tartományok határain. Minden esetben nullából indultak, és mindegyiket tíz részre osztottuk fel. A 3. ábra szemlélteti a



3. ábra
A stabilitási térképek felépítése

négydimenziós stabilitási térképek felépítését. Az kis tengelyeken az egyensúlyozó deszka (P_θ , D_θ), míg a nagy tengelyeken az egyensúlyozó személy (P_ϕ , D_ϕ) arányos és deriváló szabályzó-paraméterét ábrázoltuk. A stabil tartományokat szürke színnel jelöltük. Az időkésést addig növeltük, amíg az összes ábrán el nem tűnt a stabil tartomány.

A kapott kritikus időkéséseket (τ_{krit}) mutató stabilizálhatósági diagram az 5. ábrán látható. A diagram egy adott keréksugár és lapsúlyesztés mellett megmutatja, hogy legfeljebb mekkora lehet az egyensúlyozó személy időkésése, hogy képes legyen az egyensúlyozó deszka adott geometriai beállítása mellett is egyensúlyozni.

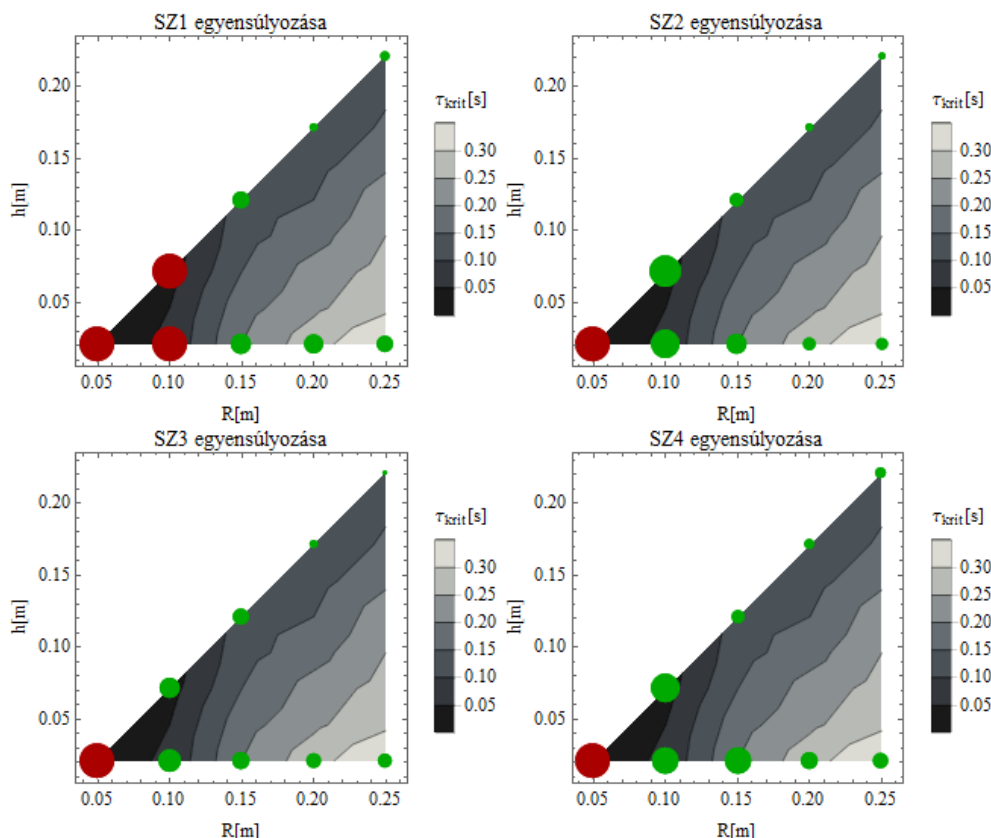
3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Célunk volt az elméleti modellből kapott eredményeket mérésekkel összehasonlítani, ezért négy személy egyensúlyozásán keresztül vizsgáltuk a stabilizálhatóság alakulását.

Az egyes személyeknek egy percig kellett egyensúlyozniuk különböző beállításokon nyitott szemmel, ez definiálta a stabil egyensúlyozást. A vállra, a csípőre és az egyensúlyozó deszka két sarkára markert helyeztünk a 4. ábrán látható módon, és videót készítettünk minden egyes egyensúlyozásról. A 4. ábrán látható a mérési elrendezés. Az L alakú keret és a ráhelyezett három marker a mozgó markerek pozíciójának meghatározásához szükséges.



4. ábra
Mérési elrendezés a kék markerekkel



5. ábra

Stabilizálhatósági diagramok és a mérési eredmények

Az 50 FPS felbontású videókból képfeldolgozással megkapható az egyes markerek súlypontjának pozíciója, amelyekből kiszámolható az egyensúlyozó deszka és a személy szögelfordulása az adott képkockán.

A stabilizálhatóság vizsgálatához feldolgoztuk a videókat, majd az egyensúlyozó deszka szögének szórásával jellemeztük az egyensúlyozást. Az 5. ábra mutatja az elméleti modellből kapott stabilizálhatósági diagramot szürkével jelölve, és a mérési eredményeket. Azokat a keréksugár-lapsüllyesztés kombinációkat, ahol az egyensúlyozó személy képes volt minimum egy percig egyensúlyozni, zöld körökkel jelöltük. A körök átmérője egyenesen arányos az egyensúlyozó deszka szögének szórásával. Piros színnel jelöltük azokat a kombinációkat, ahol nem sikerült az egy percig tartó egyensúlyozás.

Megfigyelhető, hogy az egyensúlyozó deszka szögének szórása a keréksugár csökkenésével nő, tehát egyre nehezebb egyensúlyozni. Az 5cm-es keréksugár esetén egyik személynek sem, míg a 10cm-es sugár esetén csak az SZ1 személynek nem sikerült egyensúlyoznia.

Az elméleti modellből és a mérésekből kapott eredmények összehasonlítása alapján megállapítható, hogy az agyat időkéscsökkentett PD szabályzónak feltételezve az SZ1 személy reakcióidejét 0.1s-ra becsülhetjük, míg az SZ2, SZ3 és SZ4 személyek reakcióidejét 0.05s-ra. A reakcióidő pontosabb közelítése érdekében a későbbiekben megismételjük a számításokat egy részletesebb modellel, és elvégezzük az egyensúlyozási kísérleteket egy nagyobb létszámú mérőcsoporttal.

[1] Lehotzky D, Insperger T, *Az emberi egyensúlyozás mechanikai modellezése PIDA szabályzó segítségével*, Biomechanica Hungarica.

[2] T Insperger, G Stépán, *Semi-Discretization for Time-Delay Systems – Stability and Engineering Applications*, Springer, New York, 2013.

[3] Y Asai, Y Tasaka, K Nomura, T Nomura, M Casadio, P Morasso, *A Model of Postural Control in Quiet Standing: Robust Compensation of Delay-Induced Instability Using Intermittent Activation of Feedback Control*, Plos One, 2009.