

Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság
Hungarian Technical Scientific Society of Transylvania

**XXVII. Nemzetközi
Gépészeti Konferencia**



**27th International Conference
on Mechanical Engineering**

OGÉÉT 2019

**Nagyvárad, 2019. április 25–28.
Oradea, 25-28 April, 2019**

súrlódási hatások a szabályozott mechatronikai rendszerekben

FRICTION EFFECTS IN CONTROLLED MECHATRONICS SYSTEMS

VITANOV George BSc. III.év

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.
Központi tel.: +36 1 463-1111 Központi fax: +36 1 463-1110 Központi e-mail cím: info@bme.hu
Központi honlap: <http://www.bme.hu/>

ABSTRACT

I examined a 1 DoF mechanical system, with a digital controller. The goal of the state feedback controller was to achieve a positioning tasks in a system where friction is present. The main focus of the paper is, to examine new phenomena induced by introducing friction to the system. This results in a nonlinear system, thus I relied on simulation methods during my research.

KIVONAT

A jelen dolgozat során egy digitális szabályozóval ellátott egy szabadságfokú mechanikai rendszer viselkedését vizsgáltam. A rendszerben a szabályozó állapotvisszacsatolást valósított meg, az elérendő cél egy pozicionálási feladat elvégzése volt egy a súrlódási hatásokat is figyelembe vevő szabályozott szakaszon. A dolgozat fő célja a súrlódás által nemlineárisra tett szakaszon fellépő súrlódási hatások által indukált jelenségek vizsgálata.

Kulcsszavak: Súrlódás, digitális szabályozás, stabilitás, állapotvisszacsatolás, pozicionálás

1. BEVEZETÉS

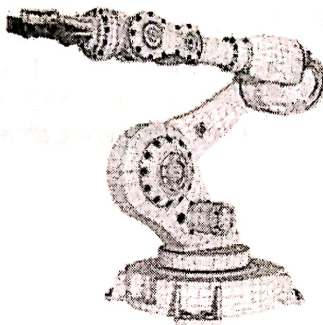
A mechatronika egyik alapvető feladata a pozicionálás. Egy pozicionálási feladat végrehajtása során fontos befolyásoló tényező a súrlódás. Gondoljunk például arra, hogy egy orvosi robot egy elektródát akar behelyezni a páciens agyának egy adott pontjába. A robotnak megfelelő pozicionálási pontossággal kell rendelkeznie különben lehet, hogy az elektróda nem a kiszemelt neuronhoz fog kapcsolódni. Mindeközben a robotkar egyes csapágyn, aktuátorain, elektromotorjain, azaz minden mozgó alkatrészén fellép a súrlódás jelensége. Ennek jelentősége, hogy a súrlódás által előidézett letapadási zóna alapvetően befolyásolja a pozicionálásunk pontosságát. A súrlódás beállási hibát okoz. Ezen problémák kiküszöbölésére jelenleg az iparban a bevett megoldás a súrlódás kompenzációs algoritmusok használata. Ezek egy adott paraméter beállítás mellett nagyon jól eliminálják a súrlódási hatásokat. Adódhat a kérdés, ha ez a módszer ilyen jól működik, akkor miért van szükség a téma további vizsgálatára?

Ennek válasza a haptikus eszközök terjedésében rejlik. A haptikus eszközök olyan rendszerek, gépek, melyek feladata az emberi felhasználóval való együttműködés, számára erőérzet azaz haptikus visszacsatolás biztosítása. Az ilyen rendszerek a jövőben kiemelt fontossággal bírhatnak. Gondoljunk csak egy sebészrobotra, mely az operáló számára nem csak vizuális, hanem haptikus visszajelzést is képes adni. Például mikor a sebész valamilyen ellenálló szövethez ér az emberi testben és át akarja vágni, akkor nagyobb ellenállást fog a robot kifejteni az orvos kezére az átvágás mozdulata során, hogy jelezze, itt a robotkarnak is nagyobb erőbevitelre volt szüksége. Egy ilyen sebészrobottal például elkérülhet, hogy a sebész átvágjon olyan szöveteket is, melyeket nem szándékozott, hiszen az ellenállás változásából rögtön érzékelheti, hogy más szövethez ért a szike.

Az ilyen és ehhez hasonló haptikus eszközök működtetése során elengedhetetlen, hogy sok különböző paraméterbeállításal is jól működjön a robotkar kezelőfelülete, hiszen az orvos kezére nagyon sokféle, különböző nagyságú és irányú erővel kell tudnia visszahatni. E mellett fontos szempont, hogy stabilitási probléma fellépése megengedhetetlen. Éppen ezért nem elég megelégedni egy adott paraméter beállítás esetén jól működő súrlódás kompenzáló algoritmussal, hanem szükséges ezen rendszerek további vizsgálata. E mellett, az egyre precízebb súrlódás kompenzációs algoritmusokkal a számítási feladatok elvégzéséhez szükséges idő is növekszik, így akár további időkésést vihetünk a rendszerbe, mely a haptikus alkalmazás során rendkívül zavaróan hathat. A nehézség a súrlódásos rendszerek szabályozásában abból adódik, hogy a szabályozónk egy térben és időben kvantált rendszer, mely mintavételezési idővel, és időkéséssel rendelkezik, míg a súrlódás jelensége folytonos időben lép fel, és nemlineáris rendszert eredményez. Éppen ezen nemlinearitási hatás miatt vizsgáltuk szabályozott mechatronikai rendszerben szimulációval a súrlódási hatásokat.

2. MODELL REDUKCIÓ

Vizsgáljuk példaként egy ipari robot modelljét.



1. ábra
Ipari robot

A robot összes szabadságfokát figyelembe véve felírt dinamikai egyenletek levetíthetők egy adott x irányra, és egy arra merőleges irányra [1]. Másképp megfogalmazva a teljes rendszer dinamikája levetíthető az x tengely mentén, így modellezhetjük a robotot egy dominánsan egy szabadságfokú rendszerrel is, ha csak az x irányú dinamikája érdekel minket. Ez indokolja, hogy jelen vizsgálataink során egy szabadságfokú rendszerekkel fogunk foglalkozni.

A bevezetés során sokszor említésre került a haptikus eszközök erő kifejtési problémája, azonban e helyett pozicionálási feladatokkal fogok foglalkozni a dolgozat során. Ezt az indokolja, hogy maguk a haptikus eszközök általában több szabadsági fokú mechanikai rendszerből, mechanizmusokból épülnek fel, hasonlóan a robotkarokhoz. A létrehozott erőérzetet a haptikus eszközök több típusában a mért elmozdulási jelek alapján hozzák létre, azaz az úgynevezett impedancia típusú szabályozást alkalmazzák. Ez a módszer matematikailag megegyezik a pozicionálás során használt technológiákkal. [2] [3]

3. SÚRLÓDÁSI MODELLEK

Szimulációim során a statikus súrlódási modellek közül a Coulomb és Stribeck [4] modellt, a dinamikus súrlódási modellek közül pedig a Dahl és a LuGre modellt implementáltam.

Az egyre bonyolultabb modellek egyre több súrlódási jelenséget próbálnak modellezni, egyszerre magukba foglalni. Az alábbi súrlódási jelenségekkel foglalkoztam a dolgozat során: letapadás jelensége, viszkózus súrlódás, mikro-elmozdulás a tapadási szakaszban, Stribeck effektus.

4. STABILITÁS

Egy szabadságfokú digitális PD szabályozóval rendelkező mechanikai rendszer modelljét fogjuk vizsgálni. A rendszerre a következő differenciálegyenlet teljesül két mintavételezési idő között, első körben súrlódási erő nélkül

$$m\ddot{x}(t) = f_j, \quad (1)$$

ahol f_j konstans a $\{t \mid t_j \leq t < t_{j+1}\}$ időintervallumban. Az egyenlet jelentése, hogy két mintavételezési pillanat között a diszkrét idejű PD szabályozó konstans gerjesztésként modellezhető mivel a folytonos idejű beavatkozó erő rekonstrukciójához az úgynevezett nulladrendű tartót használjuk fel. A két mintavételezési pillanat között eltelt időt jelölje τ . A két egymást követő mintavételezési idő között felírható differenciálegyenlet megoldható zárt alakban. Az egyenlet megoldását mátrixos alakra átírva és a szabályozási törvényt behelyettesítve az alábbi alakra jutunk

$$x_{j+1} = Ax_j, \quad (2)$$

ahol A 2×2 -es mátrix mely értékei a szabályozónk értékeitől (p és d paraméterektől) függenek. Mivel a rendszer x_{j+1} állapotát ki tudjuk számítani az előző állapot segítségével, ezért bármely n időpillanatban a rendszer állapotát egy kezdeti értékből meghatározhatjuk. Így bármely állapot kifejezhető az A^n állapot átviteli mátrixszal való szorzással.

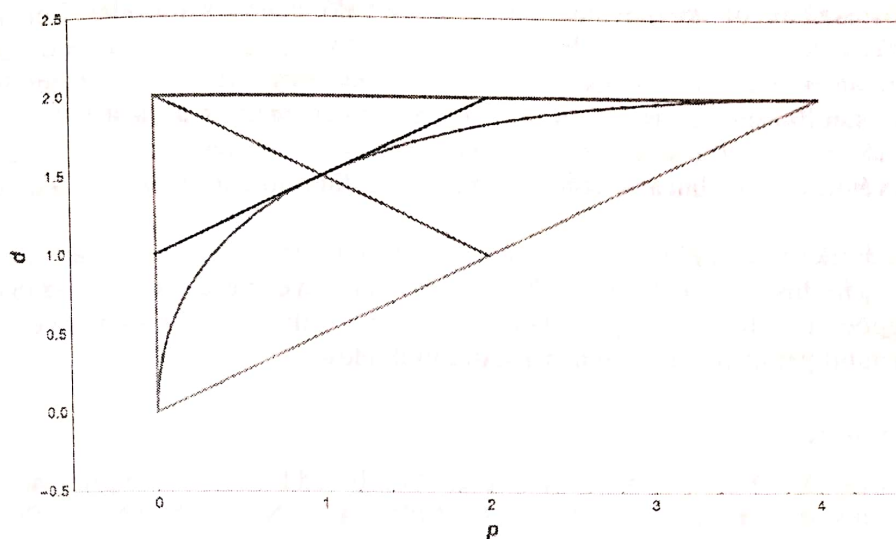
$$x_n = A^n x_0. \quad (3)$$

Ebből adódóan bármely állapot kiszámítása visszavezethető A^n -el való szorzásra. Az így kapott összefüggés egy Neumann sor, azaz egy általánosított mértani sor. Az alábbi sor konvergens ha az A mátrix

spektrális sugara kisebb mint 1. Azaz a mátrix gyökeinek nagysága kisebb, mint 1. A gyököket az alábbi módon számíthatjuk:

$$z^2 - \text{tr}(\mathbf{A})z + \det(\mathbf{A}) = 0. \quad (4)$$

Ezen egyenlet segítségével meghatározhatunk egy stabilitástérképet. A stabilitástérkép a p és d paramétertérben mutatja meg, milyen paraméter kombinációk esetén lesz stabil a szabályozásunk súrlódásmentes rendszerben.



2. ábra
Stabilitástérkép

A stabilitástérképet analitikusan csak súrlódásmentes rendszerre tudjuk levezetni, mivel a súrlódás bevezetése az egyenletekbe nemlinearitást okozna. Épp ebből következik, hogy egyes szabályozások tervezése során gyakran a súrlódást elhanyagoló stabilitástérképből következtetnek arra, hogy stabil lesz a rendszer egy adott p , d szabályozó érték esetén, azzal az érveléssel, hogy a súrlódás energia disszipáló mivoltából adódóan csak javítja a rendszer stabilitását. A továbbiakban kimutatásra kerül, hogy ez az állítás bizonyos esetekben helytelen.

5. JELENSÉGEK

Az alábbi részben a szimulációk által kimutatott különböző jelenségek kerülnek bemutatásra.

5.1. Lebegés

A csillapított lebegés jelensége abban az esetben lép fel, ha két egymástól kismértékben eltérő frekvenciájú lecsengő szinuszhullám szuperponálódik egymásra.

A rezgés során a kezdeti kitérésnél nagyobb értékekkel is találkozhatunk. Ebből az következik, hogy ha zárt térben ilyen paraméter beállításokkal próbálunk szabályozni, előfordulhat, hogy a robot az elzárt tér határait átlépi, vagy anyagi kárt okozva a munkakörnyezetből kilépve a környező tárgyaknak ütközik. Ezt a feltételezést megerősíthetjük, ha megvizsgáljuk, hogy súrlódásos rendszerben is hasonlóan fellép ez a jelenség, sőt a súrlódás bevezetése a kezdeti kitérésnél nagyobb amplitúdójú állandósult rezgést is eredményezhet. A lebegés a stabilitástérkép egy adott pontja körül lép fel. Ezen pont vizsgálata olyan szempontból fontos, hogy súrlódási jelenségeket is figyelembe véve, ebben a pontban lesz a legkisebb a súrlódásból (letapadásból) adódó statikus hiba.

5.2. Stabilizáló hatás

Bizonyos paraméterbeállítások esetén igaz, hogy a súrlódás stabilizálhatja a rendszert akár a stabilitástérkép határán kívül eső pontokban is. Ez abból adódik, hogy bár ilyen esetekben a szabályozónk túlzottan sok energiát visz a rendszerbe, túlkompenzál, a súrlódás energia disszipáló jellege miatt csökkenti a szabályozott szakaszban jelenlévő energiát, és ezáltal stabilizálja a kialakuló rezgést.

5.3. Destabilizáló hatás

Amennyiben a súrlódás nem elég nagy ahhoz, hogy a letapadás jelensége fellépjen a rendszer mozgása során, akkor az alapvetően stabilan beálló PD szabályozót a súrlódás periodikusan ismétlődő oszcillációra készíti. Ez azt jelenti, hogy a diszkrét idejű PD szabályozásnál kialakulhat olyan jelenség, mely során a rendszerben fellépő súrlódás nem stabilizáló hatással rendelkezik, hanem a stabilitási határra taszítja a rendszert. A stabilitástérképen található tartományokat vizsgálva kimondhatjuk, hogy ha A mátrix gyökeinek összege negatív valósrésztű akkor okozhat stabilitási határon való rezgést a súrlódás. Ennek jelentősége, hogy a digitális szabályozás során a bevett gyakorlat szerint csak azt vizsgálják, hogy az adott szabályozó súrlódás nélkül stabil-e. Ez onnan eredeztethető, hogy elég intuitív lenne, hogy a súrlódás disszipatív jellege miatt csak növelheti a rendszer stabilitását. Ez feltételezés legtöbb esetben meg is állja a helyét, azonban bizonyos paraméter kombinációk esetén ez a feltételezés hamis. Ez szükségessé teszi, hogy a szabályozott szakaszt a súrlódás figyelembevételével nemlineáris rendszerként vizsgáljuk amennyiben haptikus eszközt szeretnénk méretezni, tervezni.

Összefoglalva diszkrét idejű PD szabályozóval ellátott rendszerekben vizsgáltam a különböző súrlódási modellek hatását. A legfontosabb következtetés, hogy a súrlódás bevezetése stabil PD szabályozott rendszerbe a paraméterektől függően instabilitást, vagy a stabilitási határon való rezgést eredményezhet, illetve lehetővé teheti alapesetben instabil paraméterek esetén is a stabil működést.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Csaba, Budai; László, L Kovács; József, Kövecses: Combined Effect of Sampling and Coulomb Friction on Haptic Systems Dynamics JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND NONLINEAR DYNAMICS 13 : 6 Paper: 061005 , 10 p. (2018)
- [2] Shayan-Amin, S., Kovács, L. L., and Kövecses, J., 2013, „The Role of Mechanical Properties on the Behaviour and Performance of Multi-Dof Haptic Devices,” World Haptics Conference (WHC), Daejeon, South Korea, Apr. 14–17, pp. 725–730.
- [3] Kövecses, J., and Kovács, L. L., 2015, „Inertia Properties and Representations in Mechanical Systems,” ASME Paper No. DETC2015-47582.
- [4] Bo, L.C., Pavelescu, D.: The friction-speed relation and its influence on the critical velocity of stick-slip motion. Wear 82, 277–289 (1982)

OGÉT 2019



ISSN 2068-1267

