

[C.4] J. Gyeviki, A. Csiszár: „*DSP Based Positioning in Practice*” ICCC’ 2005 International Carpathian Control Conference 24-27 May 2005, Vol. 1. pp. 407-412 ISBN 963 661 644 2 ISBN 963 661 643 4 ö

cikkre hivatkozik:

[Cit. 11] Gyula Mester: „*Modeling of the Control Strategies of Wheeled Mobile Robots*”, Proceedings of the Kando Kalmán Conference, Budapest, pp. 1-3, Hungary, 2006.

[Cit. 12] Gyula Mester: „*Introduction to Control of Mobile Robots*”, Proceedings of the YUINFO’2006, pp. 1-4, Kopaonik, Serbia and Montenegro, 2006.

[Cit. 13] Gyula Mester: „*Distance Learning in Robotics*”, Proceedings of the Third International Conference on Informatics, Educational Technology and New Media in Education, pp. 239-245, Sombor, Serbia and Montenegro, 2006.

[Cit. 14] Gyula Mester: „*Applications of Mobile Robots*”, Proceedings of the 7th International Conference of Food Science, Szeged, pp. 1-5, Hungary, 2006.

[Cit. 15] Gyula Mester: „*Intelligent Mobile Robot Controller Design*”, Proceedings of the Intelligent Engineering Systems”, INES 2006, pp. 282-286, London, United Kingdom, 2006.

[Cit. 16] Gyula Mester: „*Motion Control of Wheeled Mobile Robots*”, Proceedings of the International Conference”, SISY 2006, pp. (), Subotica, Serbia, 2006.

[C.5] Gyeviki J., A. Csiszar, K. Rozsahegyi: „*Sliding modes application in pneumatic positioning*” ICM ’05 IEEE International Conference on Mechatronics, 10-12 July 2005, Volume , Issue , Page(s): 964 – 969

cikkre hivatkozik:

[Cit. 17] F.Nurtac Akdag, Ahmet Kuzucu: „*High accurate pneumatic position control*” Istanbul Technical University <http://ftp.ni.com/outgoing/Papers 2006/Nurtac - Akdag Istanbul Technical University.pdf>

[C.6] P. Korondi, J. Gyeviki: “*Robust Position Control for a Pneumatic Cylinder*” EPE-PEMC 2006 CD Rom ISBN: 1-4244-0121-6

cikkre hivatkozik:

[Cit.18] Angel Ernesto Rubio Rodriguez: „*Modelación, identificación y control de actuadores lineales electro neumáticos para aplicaciones industriales*” Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central „Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automacia y Sistemas Computacionales, Santa Clara Agosto/2007

DEBRECENI EGYETEM
Agrár- és Műszaki Tudományok Centruma
Mezőgazdaságtudományi Kar
Agrár Műszaki Tanszék

INTERDISZCIPLINÁRIS AGRÁR- ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Doktori Iskola vezető:

Prof. dr. Nagy János
MTA doktora

Témavezetők:

Dr. Csizmazia Zoltán, CSc
egyetemi tanár

Dr. Véha Antal, CSc
egyetemi docens

DOKTORI (Ph.D) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SZERVOPNEUMATIKUS POZÍCIONÁLÁS PONTOSSÁGÁNAK NÖVELÉSE DSP ALAPÚ CSÚSZÓMÓD SZABÁLYOZÁSSAL

Készítette:

Gyeviki János
doktorjelölt

Debrecen
2007

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Lineáris mozgások megvalósításának számos módja van. Olcsó áruknak köszönhetően, leggyakrabban a lineáris aktuátorokat használják. Működési elvük alapján lehetnek hidraulikus-, pneumatikus- és elektromechanikus működésűek. Az alkalmazástól függően minden típusnak megvan az előnye és a hátránya. Napjainkban egyre nő az érdeklődés a pneumatikus pozicionálás iránt. A pneumatikus munkahengereket, mint fontos munkavégző elemeket széles körben alkalmazzák az ipari automatizálás területén. Ez, a munkahengerek számos előnyös tulajdonságának köszönhető. Nevezetesen egyszerűek, tiszták, olcsók, nagy sebességre képesek, nagy a teljesítmény-tömeg viszonyuk, könnyű a karbantartásuk és eredendően rugalmasak. A pneumatikus rendszer további előnye még a robbanás- és tűzbiztonság, az egyszerű üzemvitel és nagy üzembiztonság. Egy pneumatikus munkahenger dugattyúját hagyományos alkalmazásoknál csak a két véghelyzetben állítjuk meg. Az elmúlt húsz évben a pneumatikus rendszerek nagy fejlődésen mentek át. Ez a fejlődés a szervopneumatikus rendszerek modellezésében végzett intenzív kutatómunkának köszönhető. Ezzel párhuzamosan alkalmazásra kerültek a szabályozáselmélet fejlődésének legújabb vívmányai is. Ennek eredményeként javultak a pozicionálási és pályakövetési tulajdonságok és a pneumatikus aktuátorok robottechnikai alkalmazásokra is alkalmassá váltak. A pneumatikus szervorendszerek fő hátránya az, hogy szerkezeti felépítésükből adódóan nemlineárisak. Ennek oka például a szervopneumatikus szelep változó átömlési keresztmetszetén nemlineáris áramlás-nyomás viszony, a levegő összenyomhatósága, súrlódás a csúszó felületek között stb. Az, hogy a vizsgált rendszer eredendően nemlineáris, komoly szabályozástechnikai kihívást jelent. Kimondható, hogy az iparban elterjedt PID szabályozó használata nem vezet jó eredményre.

Áttekintve az alkalmazott módszereket megállapítható, hogy a pneumatikus pozicionálás területén megtaláljuk a hagyományos és a legújabb szabályozástechnikai megoldások teljes palettáját. Közös jellemzőjük, hogy bonyolult felépítésük és működésük valamint a nagy számítás igényük miatt kevés került gyakorlati bevezetésre.

Pozicionálási pontosság és gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából megvizsgálva a különböző pozicionálási módszereket, arra a következtetésre jutottam, hogy további vizsgálatokat a csúszómozd szabályozás alkalmazásával folytatom. A szakirodalom áttekintése alapján megállapítható, hogy az elért legjobb pozicionálási pontosság 0,01 mm.

A tanszékünkön már hosszú évek óta folyó pozicionálási vizsgálatokra építve célul tűztem ki, hogy gyakorlatban megvalósítsak egy olyan egyszerű, robusztus pneumatikus szervorendszert, amelynek a pontossága jobb a szakirodalomban általam eddig fellelt legnagyobb pontosságú rendszernél (0,01 mm).

További célom, a pneumatikus pozicionálás alkalmazásának kiszélesítése, egy egyszerű, robusztus, ipari környezetben is használható, robottechnikai pozicionálási- és követési követelményeknek megfelelő szabályozás megvalósítása.

cikkre hivatkozik:

- [Cit. 2] Molnár L., Czmerk A.: „*A pneumatikus hajtás tulajdonságai, és dinamikai modellje*” OGÉT 2004 konferencia, XII. Nemzetközi Gépész Találkozó 208. oldal, Románia, Csíksomlyó, 2004. április 22-25.
- [Cit. 3] L. Molnár, A. Czmerk: „*Properties and dynamic behaviour of pneumatic drive*” GÉPÉSZET 2004, Proceedings of the fourth conference on mechanical engineering p. 701, Budapest, 2004. május 27-28.
- [Cit. 4] A. Czmerk: „*Dynamics of a servopneumatic drive*” VII. International PhD Workshop Gliwice, Lengyelország ISBN 83-922242-0-5, Conference issue Vol. 343-346
- [Cit. 5] L. Molnár, A. Czmerk : „*Modellbildung und Simulation des pneumatischen Zylinders*” 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau 19.-23. September 2005 Proceeding 415-416. ó. + poszter
- [Cit. 6] Molnár L., Czmerk A.: „*Linearisation of a servopneumatic system*” GÉPÉSZET 2006, Proceedings of the fifth conference on mechanical engineering poszter Budapest, 2006. május 25-26.
- [Cit. 7] Molnár L., Czmerk A.: „*Szervopneumatikus hajtás szimulációs vizsgálata módosított PID szabályzóval*” OGÉT 2006 konferencia, XIV. Nemzetközi Gépész Találkozó Románia, Marosvásárhely, 2006. április 27-30.

- [C.3] Gyeviki J., I. T. Tóth, K. Rózsahegy: „*Sliding mode control and its Application on a Servopneumatic Positioning System*” Transactions on AUTOMATIC CONTROL and COMPUTER SCIENCE Vol.49 (63), No.1, 2004, ISSN 1224-600X 2004, pp. 99-103

cikkre hivatkozik:

- [Cit. 8] Jan V., Marek S., Pavol M., Vladimir V., Stephen D.J., Roy P.: „*Near-Time-Optimal Position Control of an Actuator with PMSM*” Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on 11-14 Sept. 2005 Page(s):P.1 - P.10
- [Cit. 9] Vittek J., Michalik J., Vavrus V., Horvath, V.: „*Design of Control System for Forced Dynamics Control of an Electric Drive Employing Linear Permanent Magnet Synchronous Motor*” Industrial Electronics and Control Applications, 2005. ICIECA 2005. International Conference on 30-02 Nov. 2005 Page(s):1 - 6
- [Cit. 10] Vittek J., Vavrus V., Malek M., Buchner P., Michalik W.: „*Prescribed closed-loop speed dynamics control of the actuator employing linear permanent magnet synchronous motor*” Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on 14-17 Dec. 2005 Page(s):604 - 609

- [32] Gyevik J., K. Rózsahegy: „*DSP-based Control of Servopneumatic Positioning System*” SZTE SZÉF Tudományos Közlemények 24. Szeged, 2003. pp. 60-64
- [33] Gyevik J., K. Rózsahegy: „*Sliding Mode Control of Servopneumatic Positioning System*” SZTE SZÉF Tudományos Közlemények 24. Szeged, 2003. pp. 65-69
- [34] Gyevik J.: „*Improving Positioning Accuracy of Pneumatic Systems*” GÉP, Gépipari Tudományos Egyesület műszaki folyóirata 55. évf. 9. sz. / 2004 pp. 7-9, ISSN 0016-8572, <http://www.gép-ujtag.fw.hu/04sep/index2.htm>
- [35] Gyevik J., I. T. Tóth, K. Rózsahegy: „*Sliding mode control and its Application on a Servopneumatic Positioning System*” Transactions on AUTOMATIC CONTROL and COMPUTER SCIENCE Vol.49 (63), No.1, 2004, ISSN 1224-600X 2004, pp. 99-103
- [36] Csiszár A., J. Gyevik: “*Accurate position control of a pneumatic actuator using DSP*” International Journal of INGENIUM 2005(4) Vol.4. Mechatronic pp. 463-470, ISSN 1363-514x
- [37] Gyevik J. Rózsahegy K.: „*Pneumatikus rendszerek pozicionálási pontosságának növelése csúszómód szabályozással*” Pneumatika, hidraulika, hajtástechnika, automatizálás Info-Prod műszaki kiadványai IX. évfolyam 2005 május pp. 4-7, ISSN 1587-6853, ISSN 1417-8710
- [38] Gyevik J., A. Csiszar: “*Pneumatic Positioning in Practice*” SZTE SZÉF Tudományos Közlemények 25. Szeged, 2005 pp. 36-41 ISSN 1785-3419
- [39] Gyevik J., A. Csiszar: “*Sliding Mode Control in Pneumatic Positioning*” SZTE SZÉF Tudományos Közlemények 25. Szeged, 2005 pp. 62-68 ISSN 1785-3419
- [40] Gyevik J., Csiszar A.: „*DSP-k gyakorlati alkalmazása a folyamatirányításban*” Acta Agraria Kaposváriensis Vol 10 No 1, 2006 pp. 166-176 ISSN 1418-1789
- [41] Gyevik J., Korondi P., Kolonić, Fetah : „*Accurate Position Control for a Pneumatic Cylinder*” Strojarstvo Vol. 48. No. 5-6; pp. 213-225 2006. ISSN 0562-1887 If.:0.281

Hivatkozások

- [C.1] Gyevik J.: „*Nemlineáris holtidős szabályozási körök vizsgálata*”

Európai kihívások 2. 2003, pp. 11-15, ISBN 963 210 236 3

cikkre hivatkozik:

[Cit. 1] Mester Gy., Pletl Sz.: „*Rugalmas Robotok Hibrid Irányítása*” GÉP, Gépipari Tudományos Egyesület műszaki folyóirata 55. évf. 6. sz. / 2004, ISSN 0016-8572 <http://www.gép-ujtag.fw.hu/04jun/index2.htm>

- [C.2] Gyevik J., Gy. Mester: „*Dynamics of a Servopneumatic Positioning System*”

Workshop on Mechatronics, Varna, Bulgaria 2003, (proceedings on CD)

1. A TUDOMÁNYOS HÁTTÉR

A pneumatikával foglalkozó irodalom jó áttekintését találjuk [20]-ban. A kezdeti munkák a pneumatikus rendszerek modellezésében és szabályozásában az 50-es évek elejére vezethetők vissza Shearer (1956) Blackburn et al. (1960). Számos munkával találkozunk a szervopneumatikus rendszerek modellezésének részterületén is: Sanville (1971) egy egyszerű, gyakorlatban is használható modellt alkotott a levegő szelepen történő átáramlására. Ezen a területen további előrelépést jelent Anderson (1985), valamint McCloy és Martin (1980) munkái. Backe és Ohligschlaeger (1989) egzakt leírást adtak a munkahengerben uralkodó nyomás, térfogat, tömeg és hőmérséklet között. A mozgásszabályozás megvalósításához a pneumatikus aktuátor dinamikus modellje ad alapot. Számos munka született ezen a területen is: Araki et al. (1993), Hahn és Piepenbrink (1994). A szervopneumatikus pozicionálás szabályozásának fejlődésén keresztül a modern szabályozástechnika fejlődését is, nyomon követhetjük. A korai munkákban Shearer (1956), Burrows és Web (1966) valamint Vaughan (1965) lineáris PID szabályozót használtak. Lineáris modelleket használt Lai et al. (1990), Harada et al. (1988), Liu és Burrows (1988) valamint Yin és Araki (1998) is. Ezek a megoldások csak kis működési tartományban adtak elfogadható eredményt. Ezt úgy javították, hogy a működési tartományt több, szakaszonként lineáris tartományra bontották. Számos megoldás született az automatikus hangolású PID szabályozással. Fok és Ong (1999) által elért pozicionálási pontosság $\pm 0,3$ mm volt. Fujiwara et al. (1995) és Matsukuma et al. (1997) neurális hálót használt a PID szabályozó automatikus hangolására. Jeon et al. (1998) genetik algoritmust használtak a pozíció-, sebesség- és gyorsulás visszacsatolású szabályozó optimális paramétereinek meghatározására. Dugattyúrúd nélküli munkahengerrel $\pm 0,1$ mm pontosságot ért el. Wang et al. (1999) tanuló algoritmussal kiegészített PID szabályozót alkalmazott, az elért pontosság ± 1 mm.

Sok alkalmazási példát találhatunk az adaptív szabályozás területéről is: Wikander (1988), Miyata (1989), Bobrow és Jabbari (1991), Oyama et al. (1990), McDonell és Bobrow (1993), Tanaka et al. (1994), Li et al. (1997) és Soong et al. (1997). A nemlinearitás kompenzálásával Wikander 0,01 mm pozicionálási pontosságot is elért.

Tanaka et al. (1998), modell referens adaptív szabályozót használt, ahol neurális hálózattal kompenzálta a nemlinearitást, és $\pm 0,08$ mm pozicionálási pontosságot ért el. Kosaki és Sano, (1998) a szabályozó erősítését fuzzy logika segítségével hangolta, és megfigyelőt alkalmazott a zavarások hatásának csökkentésére.

Másik fontos kutatási irány a sliding mode control (csúszómód szabályozás) alkalmazásának vizsgálata. Számos munka született a témában, például: Noritsugu és Wada (1989) [1], Tang és Walker (1995) [2], Pandian et al. (1997) [3][4], Hamerlain (1995) [5], Bouri et al. (1996), Surgenor és Vaughan (1997) [6], Paul et al. (1994) [7], Song és Ishida (1997) [8][9] és Drakunov et al. foglalkoztak a csúszómód szabályozással. Drakunov et al. (1997) [10] bebizonyították, hogy a sliding mode control sikeresen használható a súrlódás kompenzálására. Az elért pontosság $\pm 0,2$ mm. Sokan alkalmazzak

fuzzy logikát és a neurális hálózatokat is: Matsui et al. (1990), Lu (1993), Araki et al. (1997), Shih és Hwang (1996) és Wang et al. (1996).

Katsumata et al. (1996), Gross és Rattan (1997) többretegű neurális hálót használtak. Norgaard et al. (1996) és Sorensen et al. (1999) prediktív szabályozás vizsgálatát végezték. A H_∞ és mintavételezett H_∞ szabályozás alkalmazásával Kimura et al. (1996) munkáiban találkozhatunk. A visszacsatolás linearizáció egy alapvető nemlineáris szabályozástechnikai eszköz. Bobrow és McDonell (1998), Kawamura et al. (1989), Bouhal et al. (1993) és Kimura et al. (1995) alkalmazta munkájában. Shu Ning és Gray M. Bone (2005) egy pozíció, sebesség és gyorsulás visszacsatolású holtzóna kompenzációs szabályozási algoritmust hasonlított össze egy csúszómód szabályozással [19].

További szabályozástechnikai megoldások: Kobayashi et al. (1995) dinamikus impedancia illesztésű robusztus szabályozást, Hamdan és Gao (2000) PID + előreccatolás + bang-bang + antiwindup szabályozást javasolnak. Matrukuma et al. (1997) egy nemlineáris PID szabályozást vizsgál. Wang et al. (1998) bemutat egy determinisztikus nemlineáris állapotvisszacsatolós módszert. Nakano et al. (1993) aktív piezoelektromos módszerrel $2\mu\text{m}$ -es pontosságot ért el. Erő és nyomaték szabályozású pneumatikus szervorendszerek számos alkalmazását találjuk a robottechnikában. Lin és Burrows (1988), Noritsugu és Takaiwa (1995) bemutatta, hogy a nyomásszabályozás növeli a pozicionálás pontosságát. Hasonló vizsgálatokat végzett Ben-Dov, Salcudean (1995), Wikander, Xiang (1996) és Hamiti et al. (1996).

Az irodalom kutatása során fellelt legtöbb megoldásnál az állandósult hiba nagyobb mint $0,01\text{ mm}$ és ez sem biztosított a dugattyú minden pozíciójában, illetve különböző nyomásértékeknél.

2. A KUTATÁS MÓDSZEREI

A kísérletek megtervezésénél a következő szempontokat kellett szem előtt tartani:

- a kísérleteket számítógépes szimulációval és fizikai modellen végzett mérésekkel terveztem;
- csak a tanszéken rendelkezésemre álló eszközök és szoftverek használatát tervezhettem;
- a szimulációs- és a fizikai modell továbbfejlesztését az első mérések tapasztalatai alapján végeztem.

Ezen munka elsődleges célja, hogy a pozicionálás pontosságát az irodalomban közölt legjobb $0,01\text{ mm}$ -es hiba alá szorítsam. Fontos szempont még a túllendülés mértékének $0,5\text{ mm}$ alá csökkentése, a lengések csökkentése illetve kiküszöbölése. Ezen paramétereket különböző dugattyú helyzetekben és henger orientációnál, súly- és rugóterheléssel is vizsgáltam. A javasolt szabályozási módszerek robusztusságát más típusú és eltérő méretű munkahengerekkel is teszteltem. Izgalmas kérdés még az, hogy mi az a legkisebb lépés (elmozdulás) amit pneumatikus munkahengerrel még biztonságosan megvalósíthatunk.

A tervezett szabályozástechnikai megoldások:

- lineáris PID szabályozás;

- [20] Gyevik J., A. Csiszar, K. Rozsahegyi: „*Sliding modes application in pneumatic positioning*” ICM '05 IEEE International Conference on Mechatronics, Taipei, Taiwan, 10-12 July 2005, Volume , Issue , Page(s): 964 – 969
<http://ieeexplore.ieee.org/search/freesearchresult.jsp?history=yes&queryText=%28gyeviki%29>
- [21] Csiszár A., J. Gyevik: “*Accurate position control of a pneumatic actuator using DSP*” 21st International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Cars & Fof 2005 17 - 20 July, Cracow, Poland, (proceedings on CD)
- [22] Gyevik J., A. Csiszár: „*High Precision Pneumatic Positioning Using DSP Based Sliding Mode Control*” 5th International Conference of Phd Students, University of Miskolc, Hungary, 14-20 August 2005, Vol. Engineering Sciences I. pp. 67-72, ISBN 963 661 673 6ö ISBN 963 661 678 7
- [23] Gyevik J., A. Csiszár: „*DSP Based Positioning in Practice*” 5th International Conference of Phd Students, University of Miskolc, Hungary, 14-20 August 2005, Vol. Engineering Sciences I. pp. 289-294, ISBN 963 661 673 6ö ISBN 963 661 678 7
- [24] Gyevik J. Csiszár A.: „*DSP alkalmazása a szabályozástechnikában*” Informatika a felsőoktatásban 2005, Debreceni Egyetem Debrecen, 2005. augusztus 24-26, pp. 131, ISBN 963 472 909 6 (proceedings on CD)
- [25] J. Gyevik, A. Csiszár: „*Development of Pneumatic Tracking Control using SMC*” Európai Kihívások III. Tudományos Konferencia, 2005. november 3. Szeged pp. 579-582 ISBN 963 482 757 8
- [26] Gyevik J. Csiszár A.: „*Pneumatikus pozicionálás pontosságának növelése módosított csúszómód szabályozással*” Európai Kihívások III. Tudományos Konferencia, 2005. november 3. Szeged pp.574-578 ISBN 963 482 757 8
- [27] P. Korondi, J. Gyevik: “*Robust and Precise Control for a Pneumatic Cylinder*” EPE-PEMC 2006 CD Rom ISBN: 1-4244-0121-6

Folyóiratban megjelent cikkek

- [28] Gyevik J., Lázár S.: „*Technológiai folyamatok számítógépes szimulációja*” KÉE ÉFK Tudományos Közlemények 14. Szeged, 1987. pp. 65-71, ISSN 0200-1381
- [29] Gyevik J., Fabulya Z.: „*Pneumatikus pozicionáló hajtás megvalósítása hagyományos elemekkel*” KÉE ÉFK Tudományos Közlemények 17. Szeged, 1994. pp. 148-157
- [30] Gyevik J., Fabulya Z. Kiss R.: „*Pneumatikus működtetésű fordított inga fuzzy szabályozással*” JATE SZÉF Tudományos Közlemények 20. Szeged, 1999. pp. 46-53, ISSN 02-38-3756
- [31] Gyevik J., Fabulya Z., Sárosi J.: „*Fuzzy logika megvalósítása C nyelven*” SZTE SZÉF Tudományos Közlemények 22. Szeged, 2001. pp. 40-45, ISSN 02-38-3756

- [9] Gyeviki J., Z. Fabulya: „*Pneumatic Positioning with Intelligent Control*”
3rd International Scientific Days of Land Management in the Great Hungarian Plan Mezőtúr, 17-18
October 2002, Vol. 4. pp. 21-25, ISBN 963 9483 02 8
- [10] Gyeviki J.: „*Nonlineáris holtidős szabályozási körök vizsgálata*”
Európai kihívások 2. 2003, pp. 11-15, ISBN 963 210 236 3
- [11] Gyeviki J., Gy. Mester: „*Modelling, Simulation and Control of a Servopneumatic Positioning System*”
microCAD 2003 International Computer Science Conference Miskolc, 6-7 March 2003, pp. 21-
26, ISBN 963 661 547 0 ISBN 963 661 555 1
- [12] Gyeviki J.: „*Control of Nonlinear Dynamical Systems*”
4th International Conference of PhD Students, University of Miskolc, Hungary, 11-17 August
2003, pp. 77-81, ISBN 963 661 585 3ö ISBN 963 661 591 8
- [13] Gyeviki J., Gy. Mester: „*Dynamics of a Servopneumatic Positioning System*”
Workshop on Mechatronics, Varna, Bulgaria 2003, (proceedings on CD)
- [14] Gyeviki J., K. Rózsahegy: „*Development of a servopneumatic positioning equipment*”
microCAD 2004 International Computer Science Conference Miskolc, 18-19 March 2004, pp.
31-36, ISBN 963 661 608 6ö ISBN 963 661 615 9
- [15] Gyeviki J., K. Rózsahegy: „*DSP-based sliding mode control of a servopneumatic positioning system*”
microCAD 2004 International Computer Science Conference Miskolc, 18-19 March 2004, pp.
37-42, ISBN 963 661 608 6ö ISBN 963 661 615 9
- [16] Gyeviki J.: „*Pneumatikus rendszerek pozícionálási pontosságának növelése*”
XI.th International Conference and Exhibition on Pneumatics and Hydraulics 2004 Hungary, 21-
23 September 2004, pp. 141-146, ISSN 1215-0851
- [17] Янош Девики – Иштван Тибор Тотх „*Повышение точности позиционирования пневматических приводов с помощью Sliding Mode Control (SMC)*”
Publishing House „Education and Science” s.r.o. (Chehiya, Praga) „Дни науки” Тематика:
Технические науки 12. Автоматизированные системы 15-27 апреля 2005 года
<http://www.rusnauka.com/Tehnika/24.html>
- [18] J. Gyeviki, A. Csiszár: „*DSP Based Positioning in Practice*”
ICCC’ 2005 International Carpathian Control Conference 24-27 May 2005, Vol. 1. pp. 407-412
ISBN 963 661 644 2 ISBN 963 661 643 4 ö
- [19] J. Gyeviki, K. Rózsahegy and A. Csiszár: „*Chattering Reduction in Sliding Mode Control of Pneumatic Actuator*”
ICCC’ 2005 International Carpathian Control Conference 24-27 May 2005, Vol 2. pp. 421-426
ISBN 963 661 645 0 ISBN 963 661 643 4 ö

- nemlineáris PID szabályozás;
- adaptív szabályozás;
- intelligens rendszerek (fuzzy rendszerek, neurális hálózatok, genetikus algoritmusok)
- csúszómód szabályozás.

Megterveztem és elkészítettem a kísérleti berendezést. A kísérleti berendezés megtervezésénél a céloom egy olyan laboratóriumi kísérleti berendezés megvalósítása volt, mely alkalmas kutatási munkánkhoz szükséges mérések és kísérletek elvégzésére. A berendezéssel szemben támasztott követelmények:

- a berendezés kereskedelmi forgalomban beszerezhető alkatrészekből épüljön fel;
- a berendezés legyen eleget a kutatási program során felmerült követelményeknek;
- a berendezés legyen univerzális és könnyen kezelhető;
- a pneumatikus pozícionálás vizsgálata mellett a berendezés legyen alkalmas hallgatói mérési gyakorlatok végzésére is.

A különböző szabályozástechnikai módszerek közül legalkalmasabbnak minden szempontból a csúszómód szabályozás bizonyult. Ezért a kísérletek további részében ennek továbbfejlesztésére, új módszerek kidolgozására helyeztem a hangsúlyt. A kutatási munka kezdetén még egy fontos döntés meghozatalára került sor:

A kísérleti berendezés használata olyan egyszerűnek és rugalmasnak bizonyult, hogy a továbbiakban a fizikai modellen végzett méréseket helyeztem előtérbe, szemben a számítógépes szimulációval.

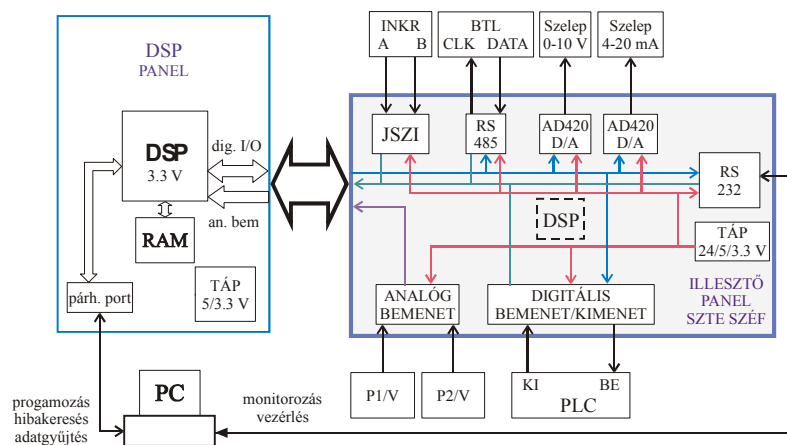
Kísérletileg igazoltam, hogy a célul kitűzött pontosság és stabilitás a klasszikus csúszómód szabályozással és hagyományos hardver és szoftver eszközökkel nem érhető el. Új hardver és szoftver eszközök készítése és új szabályozási eljárás kidolgozása vált szükségessé. Az eszközök megtervezésénél a legfontosabb szempont a nagy működési sebesség volt.

A csúszómód szabályozó megtervezése három fő lépésből áll: Első lépés a csúszófelület tervezése, a második lépés egy olyan szabályozási törvény kiválasztása, amely az állapotváltozók trajektóriáját a csúszófelületre kényszeríti, majd azon tartja, a harmadik a legfontosabb lépés, csattogásmentes (chattering free) megvalósítás. A tézisek a hardver és szoftver eszközök kifejlesztéséhez és a csúszómód szabályozók tervezésének e három fő lépéséhez kapcsolódnak.

3.1. Új hardver és szoftver eszközök tervezése

Kísérleteinkhez a Spectrum Digital „eZdspTM for TMS320LF2407” DSP kártyáját használtuk. A DSP kezdő-készlet (DSK) a PC párhuzamos portjához kapcsolható, melyen keresztül letölthető a program a DSP-be, illetve ezen keresztül lépésenként ellenőrizhető a letöltött program futása.

A DSP 3,3 V-os jelszinttel működik szemben a kísérleteknél szükséges többi eszközzel, melyek jelszintje ettől eltérő. A bemeneti- és kimeneti eszközök illesztésére és a berendezés flexibilitásának növelésére egy kiegészítő kártyát terveztem (1. ábra és 2. ábra). A DSP analóg bemeneti és digitális ki- és bemeneti interfésszel rendelkezik. A kísérletek során az arányos szelep működtetéséhez szükség volt még analóg kimeneti jelre is, ezt AD420 típusú D/A konverter állította elő. A kísérleti berendezés későbbi bővítéséhez az illesztő panelre 2 db analóg kimenet került. A digitális bemeneti jeleket a megfelelő feszültségszintre konvertáltam és optocsatolóval illesztettem a DSP bemenetére. A kimeneti digitális jeleknél hagyományos relés illesztést terveztem. Gyorsműködésű ON/OFF szelepekkel történő pozicionálás lehetőségének megteremtésére egy gyorsműködésű illesztő áramkört terveztem ULN 2064 típusú darlington meghajtóval.



1. ábra A DSP és az illesztő panel kapcsolata

A kiegészítő áramkör elkészítésénél szükség volt még a számítógéppel és különböző ipari eszközökkel való kapcsolattartásra is. A DSP és a számítógép közötti RS-232-es kommunikációt egy ICL3232IBN integrált áramkör valósítja meg.

A pozíciószabályozásánál nagy hangsúlyt kap a pozíció pontos mérése és gyors beolvasása. A kísérletek során a pozíció érzékelésére egy 0,01 mm-es felbontású (LINIMIK MSA 320 típusú) inkrementális útdátót, a pontosabb 0,001 mm-es pozicionáláshoz pedig, Balluff BTL5-S101 abszolút útdátót használtam. Az inkrementális útdátónál csak az 5 V-os jelszintet kellett illeszteni a DSP 3,3 V-os jelszintjéhez.

A választott Balluff útdátóval RS-485 vagy RS-422 soros vonalon kommunikálhatunk. A DSP digitális kimenete, bemenete és az RS-485 soros vonal közötti illesztést egy MAX488 típusú IC-vel

[18] W. E. Singhose, L. J. Porter, T. D. Tuttle, and N. C. Singer, (1997) „*Vibration Reduction Using Multi-Hump Input Shapers*” J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 119, pp. 320-326.

[19] Shu Ning and Gray M. Bone (2005) „*Experimental Comparison of Two Pneumatic Servo Position Control Algorithms*” International Conference of Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada

[20] Fulin Xiang (2001). „*Block-Oriented Nonlinear Control of Pneumatic Actuator Systems*” Doctoral Thesis Mechatronics Lab, Department of Machine Design Royal Institute of Technology S-100 44 Stockholm, Sweden TRITA-MMK 2001:9 ISSN 1400-1179 ISRN KTH/MMK/R--01/9--SE

6. A TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK:

Konferencia kiadványok

[1] Gyevik J., Fabulya Z.: „*Pozicionáló hajtások fejlesztése az élelmiszeripari anyagmozgatás és csomagolótechnika részére*” Automation '95 Conference with International Participation. BME Budapest, September 5-7, 1995. vol. I. pp. 273-281

[2] Gyevik J., Fabulya Z.: „*Pneumatikus pozicionálás megvalósítása PLC-vel*” XXXII. Ipari informatika, elektronika, mérés és szabályozás szimpózium. IEMSZSZ '97 Budapest, 1997. pp. 85-95

[3] Gyevik J., Fabulya Z.: „*Pozicionáló hajtások vezérlése PLC-vel*” Automatika, mérés- és műszertechnika konferencia Siófok, 1997. pp. 76-84

[4] Gyevik J., Fabulya Z.: „*Pneumatikus pozicionálás megvalósítása PLC-vel*” microCAD '98 International Computer Science Conference Miskolc, 25-26 February 1998, pp. 57-60

[5] Gyevik J.: „*Industrial Applications of Neural Fuzzy System*” microCAD '99 International Computer Science Conference Miskolc, 24-25 February 1999, pp. 77-81, ISBN 963 661 350 8 ISBN 963 661 355 9

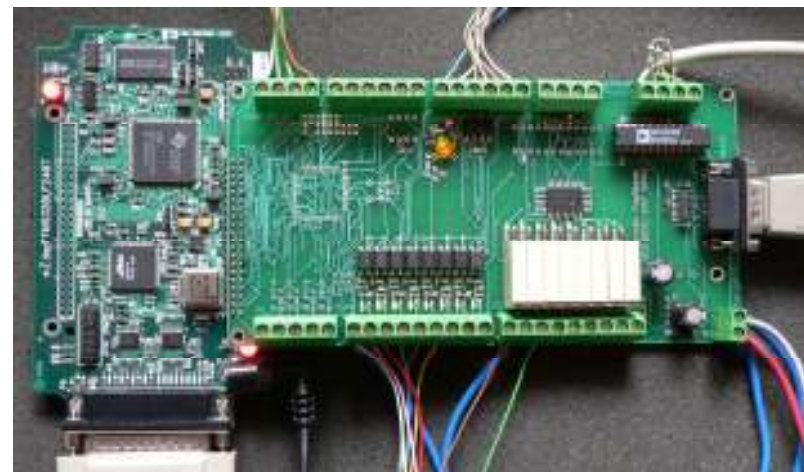
[6] Gyevik J., Z. Fabulya, R. Kiss.: „*Pneumatic Driven Inverted Pendulum with Fuzzy Control*” 2nd International Conference of PhD Students, University of Miskolc, Hungary, 8-14 August 1999, pp. 105-110, ISBN 963 661 3746 ISBN 963 661 378 8

[7] Gyevik J.: „*Fuzzy Logic Implementation on PC*” 3rd International Conference of PhD Students, University of Miskolc, Hungary, 13-19 August 2001, Vol. I. pp. 169-173, ISBN 963 661 480 6 ISBN 963 661 482 2

[8] Gyevik J. Fabulya Z.: „*Elektropneumatikus pozicionálás modellezése és vizsgálata*” HUNGELEKTRO 2002, 7th International Exhibition and Conference on Electronics Technology, Budapest, 23 April 2002, (proceedings on CD)

- [5] Hamerlain, M. (1995). „An anthropomorphic robot arm driven by artificial muscles using variable structure control”, Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, p 550–555.
- [6] Surgenor, B.W., Vaughan, N.D. (1997). „Continuous sliding mode control of a pneumatic actuator”, Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 119, no.3, pp 578-581.
- [7] Paul, A.K., Mishra, J.K. and Radke, M.G. (1994). „Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator”, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 271–276.
- [8] Song, J. and Ishida, Y. (1997). „Robust sliding mode control for pneumatic servo systems”, International Journal of Engineering Science, Vol. 35, No. 8, p 711- 723.
- [9] Song, J. and Ishida, Y. (1997). „Robust tracking controller design for pneumatic servo system”, International Journal of Engineering Science, Vol. 35, No. 10-11, p 905-920.
- [10] Drakunov, S., Hanchin, G.D., Su, W.C. and Özgüner, Ü. (1997). „Nonlinear control of rodless pneumatic servoactuator, or sliding mode versus coulomb friction”, Automatica, Vol. 33, No. 7, p 1401-1408.
- [11] Korondi P.: „Szűnetmentes áramforrások csúszómód (sliding mode) szabályozása” Egyetemi doktori Értekezés, Budapest, 1993.
- [12] Tsu-Tian Lee, Kuo-Yang Tu, Wen-Jieh Wang: „Design of a fuzzy logic controller as a suction controller” Fuzzy Sets and Systems 91, 1997, pp.305-317
- [13] K. Erbatur, O. Kaynak, A. Sabanovich, I. Rudas: „Fuzzy adaptive sliding mode control of a direct drive robot” Robotics and Autonomous Systems 19,1996, pp. 215-227
- [14] J. Guldner, V. I. Utkin: „The chattering problem in sliding mode systems” http://www.univ-perp.fr/mtns2000/articles/S114_4.pdf
- [15] Shih M. C. and Pai K. R. (2003) „Nanoaccuracy Position Control of a Pneumatic Cylinder Driven Table” International Journal of JSME, Series C, Vol. 46, No.3, pp. 1062-1068.
- [16] Ming-Chang Shih and Kei-Ren Pai (2002) “Precision Control of a Pneumatic Cylinder Using Fuzzy Control and Velocity Compensation Method” Proceeding of the 5th JFPS Intern. Symposium on Fluid Power, NARA, Japan, November 13, Vol. 1, pp.631-636.
- [17] Singer, N., Singhose, W., and Kriekku, E., (1997) „An Input Shaping Controller Enabling Cranes to Move Without Sway” ANS 7th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Augusta, GA

oldottam meg. A program a DSP egy digitális kimenetét és egy digitális bemenetét használja a szinkron soros kommunikáció kialakítására.



2. ábra A DSP és az illesztő panel kapcsolata

A kimenet a BTL útadónak a szinkron jelet adja, a bemenet az útadótól jövő adatot fogadja. Az 1. és 2. ábrákon látható, hogy az illesztő panel NYÁK-ját úgy terveztem, hogy egy DSP beültetése után önálló pozicionáló egységként is használható legyen.



3. ábra Kezelőfelület

A kísérletek során az illesztő áramkör soros portját a DSP és a PC közötti kommunikáció megvalósítására, a pozíció vizuális monitorozására használtam. Ennek segítségével egy kezelő felület készítettem (3. ábra).

A szabályozó programot „C” nyelven készült a Spectrum Digital Code Composer segítségével. A pontos pozicionálás legfontosabb feltétele a gyors működés. Előzetes megfontolások alapján a mintavételezési időt 2 ms-ra választottam. Ebbe az időbe kell, hogy beleférjen a pozíció beolvasása, a csúszómód szabályozás algoritmusának lefuttatása és a mért paraméterek eltárolása. A szabályozó program a DSP programmemóriájában helyezkedik el, így a szabályozás a PC-től függetlenül működik. Bonyolultabb feladatoknál a pozíciószabályozás és a gép vezérlése különválasztható. A DSP csak a pozicionálást végzi, a vezérlési feladatokat pl. egy PLC-re bízhatjuk. A PLC elküldi a DSP-nek a kívánt pozíciót, a DSP elvégzi a pozíciószabályozást, majd jelzi a PLC-nek, hogy a kívánt pozícióban van.

A szabályozó tervezéséhez használt egyenletek

A munkahenger modelljének elkészítéséhez meg kell vizsgálni a levegő, fojtáson történő átáramlását, és el kell készíteni egy kamra töltésének modelljét.

Az áramlási jelenségek leírásához néhány egyszerűsítést kell tennünk:

- az áramlást egydimenziós áramlásként kezeljük;
- az áramlásban résztvevő levegőt ideális gáznak tekintjük, azaz elhanyagoljuk a levegő áramlása közben létrejövő belső súrlódást és a levegőrészecskék közötti vonzerőt.

Az áramlás leírásához négy jellemzőt kell az áramvonal mentén meghatározni:

sebesség (w);

nyomás (p);

hőmérséklet (T);

sűrűség (ρ), illetve fajtérfogat ($v = \frac{1}{\rho}$).

A négy jellemző meghatározásához négy egyenletet kell felírunk:

$$\bullet \text{ állapotegyenlet} \quad p \cdot v = R \cdot T ; \quad (3.1)$$

$$\bullet \text{ energiaegyenlet} \quad c_p \cdot T + \frac{w^2}{2} = \text{állandó} ; \quad (3.2)$$

$$\bullet \text{ Euler-egyenlet} \quad w \cdot dw + \frac{dp}{\rho} = 0 ; \quad (3.3)$$

$$\bullet \text{ folytonossági egyenlet} \quad A \cdot w \cdot \rho = \text{állandó} . \quad (3.4)$$

Az alapegyenletek figyelembevételével levezethető az összenyomható ideális súrlódásmentes gázokra érvényes Bernoulli egyenlet, illetve egy tartályból csővezetéken kiáramló levegőre vonatkozó egyenlet (a nulla index a tartályban uralkodó állapotra vonatkozik).

A mozgásegyenlet az erőegyensúly alapján írható fel:

Megfigyelve a 18. ábrát azt látjuk, hogy a gyorsulás-korrekciónak köszönhetően akár 0.001 mm-es lépésközzel is megközelíthetjük a cél-pozíciót. A beavatkozó jelet megvizsgálva, azt láthatjuk, hogy a szabályozás emlékeztet Singhose et. al által ismertetet [16] [17] rugalmas rendszerek vibrációjának csökkentésére javasolt „input shaping” módszerre.

4. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA, TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

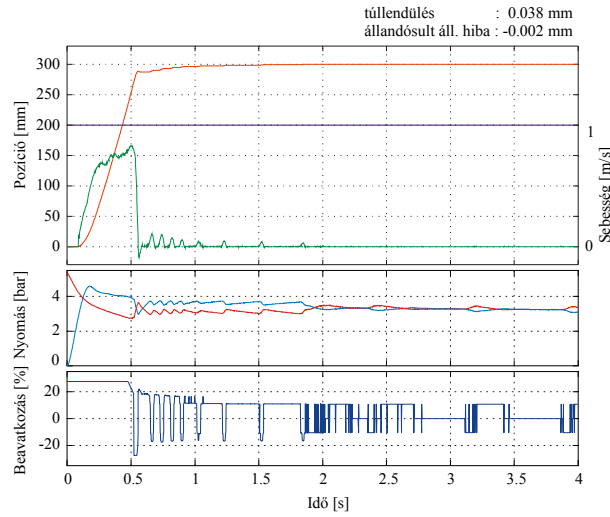
A kutatás során elért eredményeket számos hazai és nemzetközi konferencián adtam elő és folyóiratban közöltem. A kutatás jól kapcsolható a felsőfokú oktatáshoz is, a szerzett ismereteket felhasználtam az oktatásban, a hallgatókat bevontam a kutatásba. A számos hazai TDK-s siker mellett nemzetközi versenyben is helytálltak hallgatóim (<http://www.handson.org.tw/>, <http://www.handson.org.tw/video2/3/3.mpg>).

A pneumatika-gyártóktól, az ipari alkalmazóktól és oktatási intézményektől érkező érdeklődés arra ösztönöz, hogy a továbblépés irányul elsősorban egy önálló, intelligens, az ipari számítógépekkel és Programozható Logikai Vezérlőkkel (PLC) kommunikálni képes pozicionáló egység kifejlesztését jelöljem meg. Az egység az irányító berendezéstől kapja a kért pozíciót, elvégzi a pozicionálást, majd jelzi azt az irányító berendezésnek.

A PhD értekezésem elkészítésének végén ismerkedtem meg Ming-Chang Shih – vel a taiwani National Cheng kung University professzorával, aki megerősítette feltevésem, hogy a pozicionálás pontosságának elsősorban az útdő felbontása szab határt. A Shih által elért pozicionálási pontosság 20 nm [15, 16]. Céлом beszerezni egy 4um felbontású Heidenhein inkrementális útdőt és egy jelfeldolgozó elektronikát, mellyel 1024-szeres aláosztás valósítható meg. Így lehetővé válik, hogy a nanométeres tartományban is méréseket végezzünk.

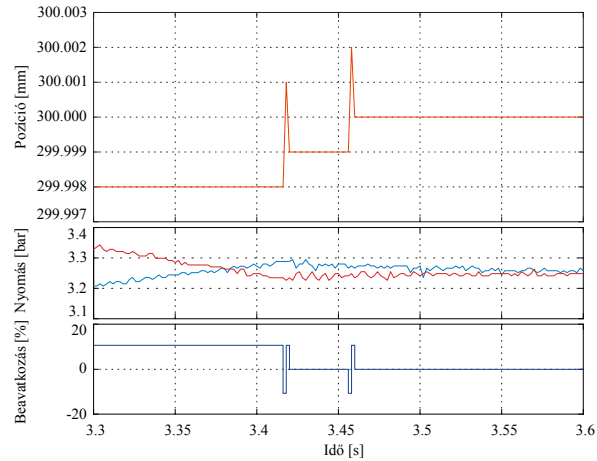
5. HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Noritsugu, T. and Wada, T. (1989). „Adaptive variable structure control of pneumatically actuated robot”, *Proceedings of the First International Symposium on Fluid Power, JHPS, Tokyo*, p 591–598.
- [2] Tang, J. and Walker, G. (1995). „Variable structure control of a pneumatic actuator”, *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 117, pp 88-92.
- [3] Pandian, S.R., Hayakawa, Y., Kamoyama Y. and Kawamura, S. (1997). „Practical design of adaptive model-based sliding mode control of pneumatic actuators”, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics '97*, New York, USA.
- [4] Pandian, S.R., Hayakawa, Y., Kanazawa, Y., Kamoyama, Y. and Kawamura, S. (1997). „Practical design of sliding mode controller for pneumatic actuators”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 119, p 666-674.



17. Pozicionálás két csúszóegyenes mentén, két határréteg és gyorsulás-korrekció alkalmazásával

Az így kialakított szabályozóval vízszintes és függőleges orientációjú munkahengerrel, terhelés nélkül illetve súly- és rugó terheléssel végeztünk pozicionálási kísérleteket. A mérési eredmények a szabályozás robusztusságát igazolták (17. ábra).



18. Pozicionálás két csúszóegyenes mentén, két határréteg és gyorsulás-korrekció alkalmazásával (részlet 4)

$$M \cdot \ddot{x} = p_a \cdot A_a - p_b \cdot A_b - d \cdot \dot{x} - k \cdot x - F_f \quad (3.5)$$

A geometriai jellemzők (A_a és A_b) és a terhelést meghatározó tényezők (M , k , d és F_f) ismeretén kívül a p_a és p_b nyomások ismerete is szükséges.

$$\dot{p}_a = \frac{1}{V_a} [R \cdot T \cdot \dot{m}_{abe} - p_a \cdot \dot{V}_a] = \frac{1}{V_a} [R \cdot T \cdot \dot{m}_{abe} - p_a \cdot A_a \cdot \dot{x}] \quad (3.6)$$

$$\dot{p}_b = \frac{1}{V_b} [-R \cdot T \cdot \dot{m}_{bki} - p_b \cdot \dot{V}_b] = \frac{1}{V_b} [-R \cdot T \cdot \dot{m}_{bki} + p_b \cdot A_b \cdot \dot{x}] \quad (3.7)$$

(3.6) és (3.7) behelyettesítésével:

$$M \cdot \ddot{x} = \frac{1}{V_a} [R \cdot T \cdot \dot{m}_{abe} - p_a \cdot A_a \cdot \dot{x}] \cdot A_a - \frac{1}{V_b} [-R \cdot T \cdot \dot{m}_{bki} + p_b \cdot A_b \cdot \dot{x}] \cdot A_b - d \cdot \dot{x} - k \cdot x \quad (3.8)$$

$$\ddot{x} = \frac{A_a}{M \cdot V_a} R \cdot T \cdot \dot{m}_{abe} - \frac{A_a}{M \cdot V_a} p_a \cdot A_a \cdot \dot{x} + \frac{A_b}{M \cdot V_b} R \cdot T \cdot \dot{m}_{bki} - \frac{A_b}{M \cdot V_b} p_b \cdot A_b \cdot \dot{x} - \frac{d}{M} \dot{x} - \frac{k}{M} x \quad (3.9)$$

$A_a \cdot x + V_{a0}$ és $A_b \cdot (L - x) + V_{b0}$ behelyettesítésével

$$\ddot{x} = \frac{A_a}{M \cdot (A_a \cdot x + V_{a0})} R \cdot T \cdot \dot{m}_{abe} - \frac{A_a}{M \cdot (A_a \cdot x + V_{a0})} p_a \cdot A_a \cdot \dot{x} + \frac{A_b}{M \cdot (A_b \cdot (L - x) + V_{b0})} R \cdot T \cdot \dot{m}_{bki} - \frac{A_b}{M \cdot (A_b \cdot (L - x) + V_{b0})} p_b \cdot A_b \cdot \dot{x} - \frac{d}{M} \dot{x} - \frac{k}{M} x \quad (3.10)$$

Mivel a hengerterekben uralkodó nyomás változási sebessége a be- illetve a kilépő levegő tömegáramától függ, meg kell határozniuk \dot{m}_{be} illetve \dot{m}_{ki} értékét.

$$\dot{m}_{be} = \mu_{fa} \cdot p_{be} \cdot A_{fa}(u) \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{be}}} \cdot \Psi \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{ki} = \mu_{fb} \cdot p_{ki} \cdot A_{fb}(u) \cdot \sqrt{\frac{\chi}{R \cdot T_{ki}}} \cdot \Psi' \quad (3.12)$$

A részletes levezetés megtalálható a disszertációban.

3.3. A csúszómód szabályozás elméleti alapjai

Tegyük fel, hogy rendszerünket egy n -ed fokú differenciálegyenlet írja le.

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = f(\mathbf{x}(t)) + G(\mathbf{x}(t), u_b(t)) + z(t) \quad (3.13)$$

$$y(t) = x(t) \quad (3.14)$$

Ahol

$$\frac{d}{dt} x^{(i)} = x^{(i+1)} \quad (i = 0, \dots, n-1)$$

és

$$\mathbf{x}(t) = (x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \in R^n$$

a rendszer állapotvektora,

$$y(t) \in R$$

a rendszer kimenete. A (3.10) és (3.13) összevetésekor láthatjuk, hogy a pneumatikus rendszerünk egy harmadrendű differenciálegyenlettel írhatjuk le. Ha (3.10)-be behelyettesítjük (3.11)-et és (3.12)-t,

$f(\mathbf{x}(t))$ és $G(\mathbf{x}(t), u_b(t))$ korlátos függvények értéke kifejezhető:

$$f(\mathbf{x}(t)) = -\frac{A_a}{M \cdot (A_a \cdot x + V_{a0})} p_a \cdot A_a \cdot \dot{x} - \frac{A_b}{M \cdot (A_b \cdot (L-x) + V_{b0})} p_b \cdot A_b \cdot \dot{x} - \frac{d}{M} \ddot{x} - \frac{k}{M} \cdot \dot{x}$$

$$G(\mathbf{x}(t), u_b(t)) = \frac{A_a}{M \cdot (A_a \cdot x + V_{a0})} R \cdot T \cdot \mu_{fa} \cdot p_{be} \cdot A_{fa}(u_b) \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{be}}} \cdot \Psi + \frac{A_b}{M \cdot (A_b \cdot (L-x) + V_{b0})} R \cdot T \cdot \mu_{fb} \cdot p_{ki} \cdot A_{fb}(u_b) \cdot \sqrt{\frac{\chi}{R \cdot T_{ki}}} \cdot \Psi'$$

Jelölje $u_b(t)$ a bemenőjelet, mely jel az $y(t)$ kimenőjelet arra kényszeríti, hogy kövesse az $y_d(t)$ referencia jelet. A követési hibát jelöljük

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad \text{- vel,} \quad (3.15)$$

idő szerinti i -edik deriváltját pedig

$$e^{(i)}(t) = y_d^{(i)}(t) - y^{(i)}(t) \quad \text{- vel.} \quad (3.16)$$

A megoldás lényege az, hogy a csúszóegyenes mentén egy gyorsulás-korrekciós határreteget képezve a beavatkozó jelet a határreteken belül a gyorsulás előjelének függvényében korrigálom (16. ábra). A határreteken kívül ($s < -s_a$ vagy $s_a \leq s$) a beavatkozó jelet nem változtatom meg:

A gyorsulás-korrekciós határreteken ($\pm s_a$) kívül a beavatkozó jel a gyorsulás előjelétől függetlenül egyenlő az eredeti u_b értékkel:

$$\text{ha } s \leq -s_a \text{ vagy } s_a \leq s \text{ akkor } u_{ba} = u_b$$

Belépve a határretegbe a beavatkozó jel értékének meghatározásánál a gyorsulás előjelét is figyelembe vesszük.

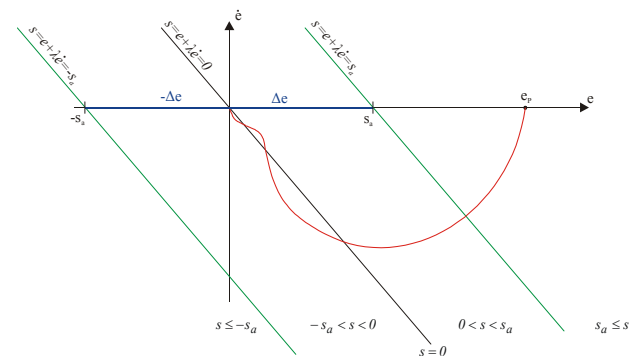
$$\text{ha } 0 < s < s_a \text{ és } \ddot{e} \leq 0 \text{ akkor } u_{ba} = u_b$$

$$\text{ha } 0 < s < s_a \text{ és } \ddot{e} > 0 \text{ akkor } u_{ba} = 0$$

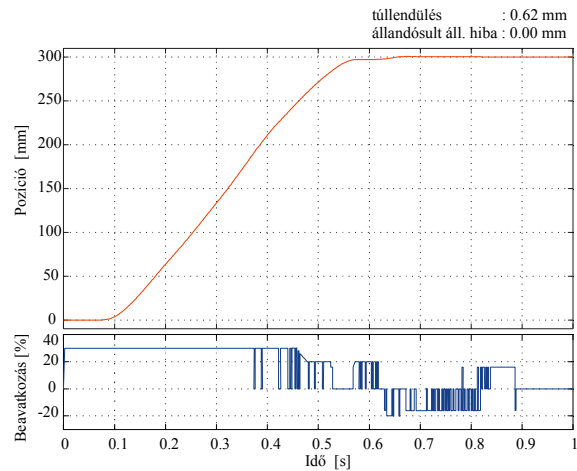
$$\text{ha } s = 0 \text{ akkor } u_{ba} = 0$$

$$\text{ha } -s_a < s < 0 \text{ és } \ddot{e} \leq 0 \text{ akkor } u_{ba} = 0$$

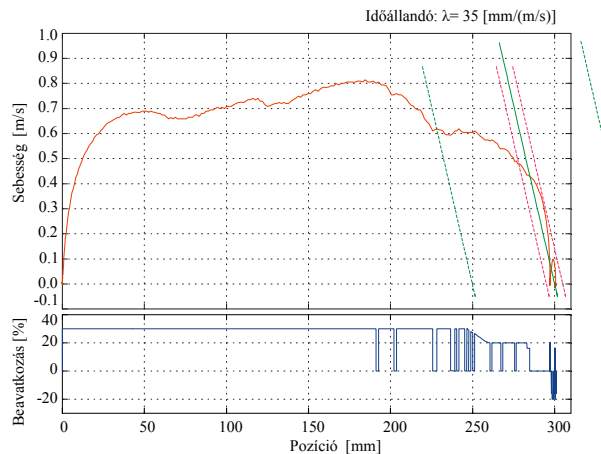
$$\text{ha } -s_a < s < 0 \text{ és } \ddot{e} > 0 \text{ akkor } u_{ba} = u_b$$



16. ábra Csúszómód szabályozás, gyorsulás-korrekcióval



14. ábra Pozicionálás függőleges orientációjú munkahengerrel (időfüggvény)



15. ábra Pozicionálás függőleges orientációjú munkahengerrel (trajektória)

3. TÉZIS: (A csúszómód szabályozási törvényéhez kapcsolódó tézis)

Kísérletekkel igazoltam, hogy a nagyobb pontosságú (0,001 mm) pozicionálás esetén a stabilitás sokkal rosszabb, mint a 0,01 mm felbontású inkrementális útdó használatánál. A stabilitás javítására és a pozicionálás pontosságának növelésére új szabályozási törvényt dolgoztam ki, melynek lényege az, hogy a gyorsulás előjelétől függően módosítom a beavatkozás mértékét, azaz az egyszerűsítés miatt elhagytam harmadik dimenziót (a hibajel második deriváltját) részben visszahozom.

$z(t)$ a zavar időfüggvényét jelöli. A zavarról feltételezzük, hogy korlátos. A korlátok a rendszer fizikai határaiból következnek. Ha $y_d(t)$ értéke konstans, pozicionálásról beszélünk. A hozzáférhető irodalomban általában az egységugrás alapjel hatását vizsgálják. Az $y_d(t)$ alapjéről azt feltételezzük, hogy legalább n -szer differenciálható az idő szerint. Ebből következően az e hibajel is legalább n -szer differenciálható.

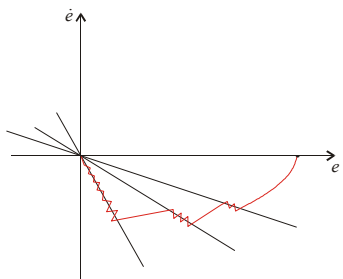
A fentiek alapján a hibajel és deriváltjai az $n-1$ -edik deriválttal bezárólag biztosan folytonosak, vagyis a hibajel trajektóriája minden esetben folytonos görbével írható le az n dimenziós fázistérben. Tehát a szabályozóköre is ehhez kell alkalmazkodnia. Legyen az alapjel egységugrás, ami a $t>0$ tartományban tetszőleges számszor differenciálható. Az alapjelugrás hatására fellépő hiba megszüntetéséhez tervezzünk a hibajel n dimenziós fázistérében egy olyan – az origóban végződő – folytonos trajektóriát, amelyik elvileg pontosan követhető. Ez természetesen azt feltételezi, hogy a trajektória tervezése során figyelembe vesszük a rendszer és a beavatkozáj fizikai korlátait. Esetükben a szükséges háromdimenziós fázistér helyett a megvalósítás gyakorlati nehézségei miatt kétdimenziós fázistérrel választottam. Ez nemmodellezett dinamikát jelent és csattogást eredményez. Az alkalmazott szervoszelenp középhelyzetben zárt. Ebből adódóan a csattogás nem csak káros lehet, hanem hasznos is, megakadályozza, hogy a hengerterekben a nyomás a légköri nyomásig csökkenjen. Az 1. tézis a gyakorlatban is használható kétdimenziós csúszófelület (csúszóegyenes) tervezését mutatja.

3. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

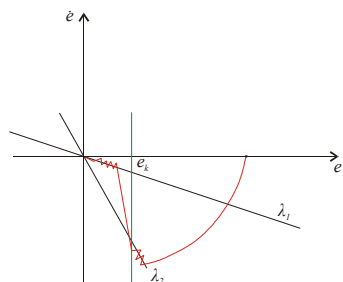
1. TÉZIS: (A csúszófelület tervezéséhez kapcsolódó tézis)

Kidolgoztam egy új, két csúszóegyenes mentén történő pozicionálást. Kísérleti eredményekkel igazoltam, hogy a kidolgozott szabályozási módszer gyors, stabil, robusztus és az elért pozicionálási pontosság megegyezik az alkalmazott inkrementális útdó felbontásával, azaz 0,01 mm. Kísérletekkel igazoltam, hogy a vizsgált rendszer csak dinamikusan kezelhető, ezt segíti az alkalmazott kétdimenziós fázistér. Kidolgoztam egy új módszert az impulzusszám módosított csúszómód szabályozást, a PNMSMC-t (Pulse Number Modified Sliding Mode Control). Az új módszer biztosítja azt, hogy a nyomás a munkahenger egyik terében se csökkenjen kritikus érték alá.

Az irodalomban a csúszóegyenes megválasztására vonatkozóan azt találjuk, hogy két egymás ellen ható követelmény között kell az optimumot megtalálni. Minél kisebb az egyenes meredeksége, annál hamarabb éri el a trajektória a csúszóegyeneset, de annál lassabb az egyenes mentén a beállítás. A gyorsaság és a robusztusság követelményének együttes kielégítése érdekében a csúszóegyenes meredekségének adaptív változtatását javasolják [11][12][13] (4. ábra).



4. ábra A csúszóegyenes meredekségének adaptív megválasztása



5. ábra Két csúszóegyenes fordított kiválasztása

Pneumatikus pozicionálás csúszómód szabályozásánál alkalmazva a javasolt megoldást nem kaptam jó eredményt. Úgy is mondható, hogy egyesítettem a kis- és a nagy-mereedségű csúszóegyenes hátrányos tulajdonságait.

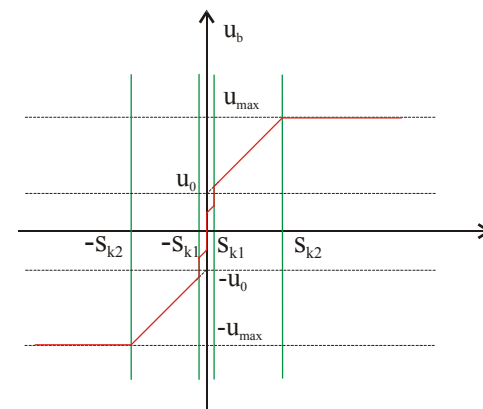
A hátrányok kiküszöbölésére és az előnyök egyesítésére egy új megoldást javasoltam (5. ábra). A megoldásban két csúszóegyeneset alkalmaztam úgy, hogy kezdetben, (a cél pozíciótól távol) a nagyobb mereedségű egyenes mentén, a pozicionálás utolsó fázisában, pedig a kisebb mereedségű egyenes mentén végeztem a pozicionálást.

A nagy mereedségű egyenes biztosítja a gyors megközelítést a kis mereedségű, pedig a pontos pozicionálást. Ahol e_k azt a küszöbértéket jelenti, ahol a nagyobb mereedségű egyenesről átkapcsolunk a kisebb mereedségűre.

$$\text{ha } e > e_k \quad s = e + \lambda_2 \cdot \dot{e}$$

$$\text{ha } e < e_k \quad s = e + \lambda_1 \cdot \dot{e}$$

Az így végzett pozicionálás időfüggvénye a 6. ábrán, a pozíció-sebesség trajektóriája pedig a 7. ábrán látható. Megállapíthatjuk, hogy a javasolt szabályozás gyors, pontos és a túllendülés is kedvező.



13. ábra Két határreteg alkalmazása küszöbértékkel

$$\text{ha } -s_{k1} < s < s_{k1} \quad \text{akkor} \quad u_b = \delta \cdot \left(u_0 \cdot \text{sign}(s) + \frac{u_{max} - u_0}{s_{k2}} \cdot s \right)$$

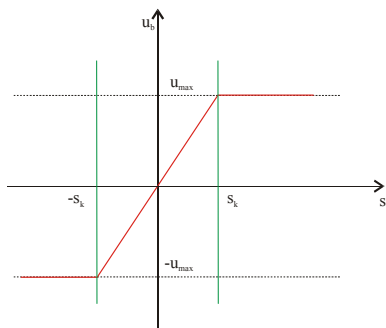
$$\text{ahol } 0 < \delta \leq 1$$

$$\text{ha } -s_{k2} < s \leq -s_{k1} \quad \text{vagy} \quad s_{k1} \leq s < s_{k2} \quad \text{akkor} \quad u_b = u_0 \cdot \text{sign}(s) + \frac{u_{max} - u_0}{s_{k2}} \cdot s$$

$$\text{ha } s \geq s_{k2} \quad \text{akkor} \quad u_b = u_{max}$$

$$\text{ha } s \leq -s_{k2} \quad \text{akkor} \quad u_b = -u_{max}$$

Ezt a módszert függőleges orientációjú munkahengerre alkalmazva (a gravitáció külső zavarás) a 14. ábrán és a 15. ábrán látható eredményt kaptam.

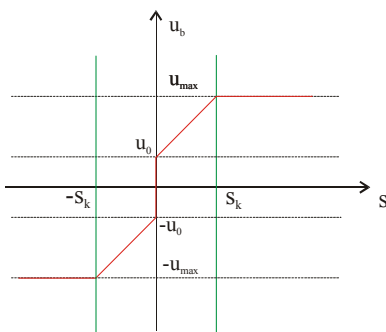


11. ábra Határréteg alkalmazása

$$u_b = \frac{u_{max}}{s_k} \cdot s \quad \text{ha} \quad -s_k < s < s_k$$

$$u_b = u_{max} \quad \text{ha} \quad s \geq s_k$$

$$u_b = -u_{max} \quad \text{ha} \quad s \leq -s_k$$

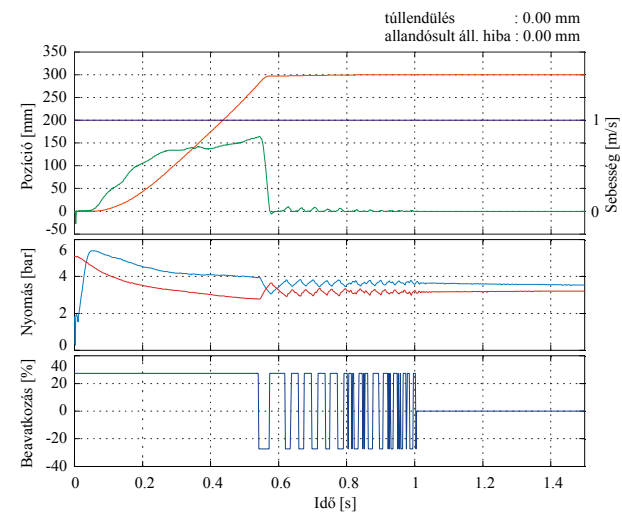


12. ábra Határréteg alkalmazása küszöbértékkel

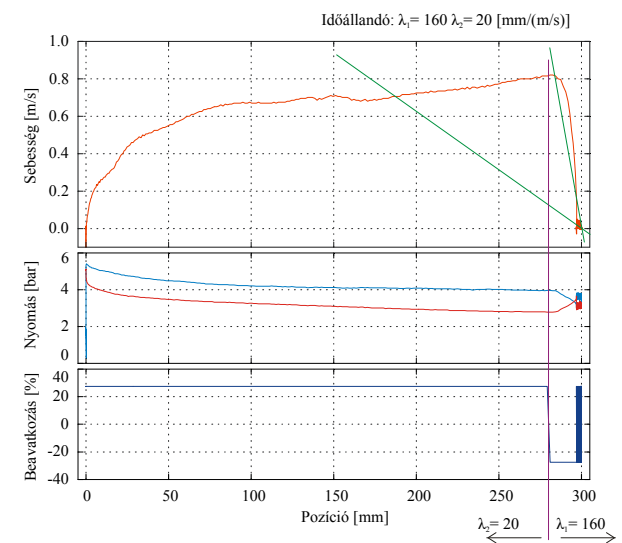
$$\text{ha} \quad -s_k < s < s_k \quad \text{akkor} \quad u_b = u_0 \cdot \text{sign}(s) + \frac{u_{max} - u_0}{s_k} \cdot s$$

$$\text{ha} \quad s \geq s_k \quad \text{akkor} \quad u_b = u_{max}$$

$$\text{ha} \quad s \leq -s_k \quad \text{akkor} \quad u_b = -u_{max}$$



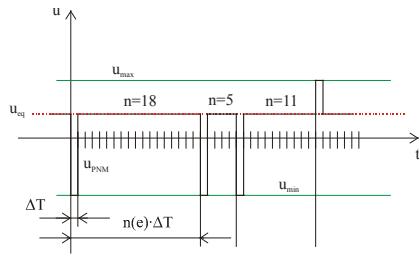
6. ábra Pozicionálás két csúszóegyenes mentén (időfüggvény)



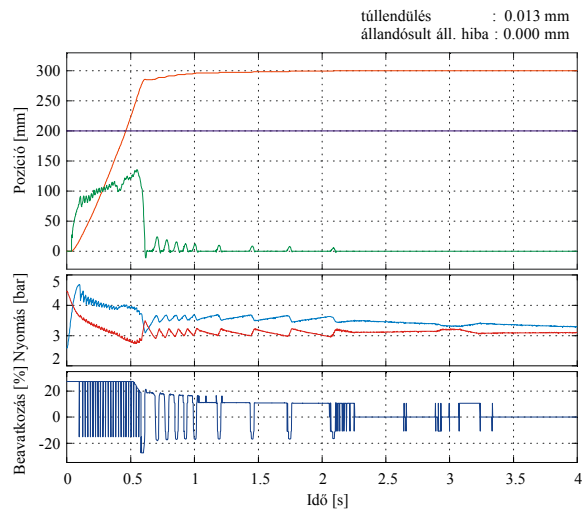
7. ábra Pozicionálás két csúszóegyenes mentén (trajektória)

A Pulse Number Modified Sliding Mode Control szabályozó program 2 milliszekundumonként fut le ($\Delta T=2$ ms). Minden $n(e) \times \Delta T$ periódus kezdetén egy ciklusidőre a munkahenger ellentétes oldala kerül

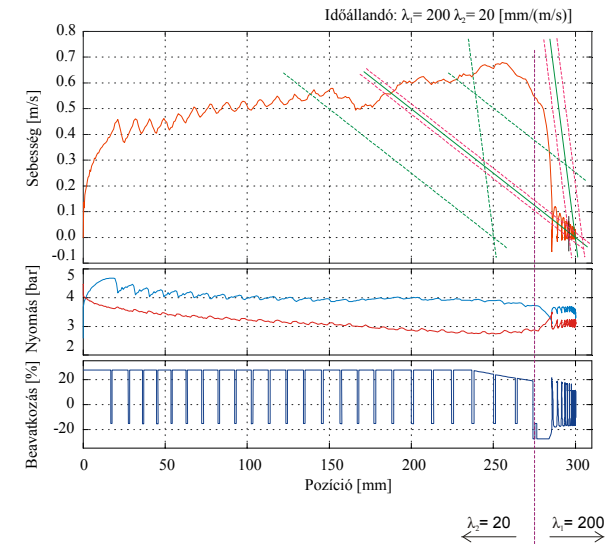
nyomás alá, megakadályozva a nyomás lecsökkenését (8. ábra). Ezt a módosítást csak a határregegen kívül kell alkalmazni. Az impulzusszám $n(e)$ értékét az e hiba határozza meg.



8. ábra Impulzusszám moduláció



9. ábra Pozicionálás két csúszóegyenes mentén, két határregegen, gyorsulás korrekció és impulzusszám-moduláció alkalmazásával (idődiagram)



10. ábra Pozicionálás két csúszóegyenes mentén, két határregegen, gyorsulás korrekció és impulzusszám-moduláció alkalmazásával (trajektória)

2. TÉZIS: (A csúszómód csattogás- (lengés) mentes megvalósításához kapcsolódó tézis)

A csattogás csökkentésére kidolgoztam egy új, többszörös határregegű csúszóegyenes mentén küszöbértékkel rendelkező beavatkozó jellel történő pozicionálást. Kísérletekkel igazoltam a módszer hatékonyságát.

Az irodalom szerint [14] tovább javíthatjuk a pozicionálást és csökkenthetjük a csattogást (chattering), ha a csúszóegyenes mentén határregeget képezve a beavatkozó jelet arányosan csökkentjük (11. ábra).

Kísérletekkel igazoltam, hogy a csattogás csökkent ugyan, de a cél pozíció közelében lecsökkent beavatkozó jel miatt a csúszás-megakadás (stick-slip) jelensége lépett fel és a pozicionálás pontossága erősen romlott a korábbi eredményekhez képest, azaz pneumatikus pozicionálásnál a határregegen, módosított beavatkozó jel nélkül nem használható. A hátrány kiküszöbölésére a 12. ábrán látható küszöbérték bevezetését javasoltam. Ezzel a megoldással megakadályozhatjuk, hogy a beavatkozó jel az u_0 küszöbszint alá csökkenjen. Tovább javíthatjuk a beállást, ha csúszóegyenes mentén még egy határregeget bevezetve, a beavatkozó jelet két lépcsőben arányosan tovább csökkentjük (13. ábra).