



## DSP-k gyakorlati alkalmazása a folyamatirányításban

<sup>1</sup>Gyeviki J., <sup>2</sup>Csiszár A.

<sup>1</sup>SZTE SZÉF Műszaki és Informatika Tanszék Szeged Mars tér 20.

<sup>2</sup>SZTE TTK Elméleti Fizika Tanszék Szeged Tisza Lajos krt. 84-86.

### ÖSSZEFOGLALÁS

*Munkánkban egy Texas Instruments TMS320LF2407 típusú DSP-t használtunk egy csúszó-mód szabályozású pneumatikus pozícionálás megvalósítására. 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 levegő összenyomhatóságának a munkahengerben fellépő sűrűlődnak és a levegő szervoszelepen történő nemlineáris átáramlásának köszönhetően a pneumatikus szervorendszer erősen nemlineáris, variáns rendszer. A pneumatikus rendszer nemlinearitása miatt robusztus szabályozást kell alkalmazni. A csúszó-mód szabályozást a hetvenes évek végén kezdték alkalmazni robot manipulátorok irányítására.*

(Kulcsszavak: DSP, csúszó-mód szabályozás, pneumatikus rendszer, pozícionálás)

### ABSTRACT

#### Practical applications of DSPs in Process Control

<sup>1</sup>J. Gyeviki, <sup>2</sup>A. Csiszár

<sup>1</sup>University of Szeged, College Faculty of Food Engineering Technical and Informatics Department, Szeged Mars tér 20.

<sup>2</sup>University of Szeged, Faculty of Natural Science Department of Theoretical Physics, Szeged Tisza Lajos krt. 84-86

*In this paper, a sliding mode control is implemented on the Texas Instruments TMS320LF2407 digital signal processor (DSP) for control a pneumatic positioning system. As an important driving element, the pneumatic cylinder is widely used in industrial applications for many automation purposes thanks to their variety of advantages, such as: simple, clean, low cost, high speed, high power to weight ratio, easy maintenance and inherent compliance. The pneumatic servo-system is a very nonlinear time-variant control system because of the compressibility of air, the friction force between the piston and the cylinder, air mass flow rate through the servo-valve, etc. Because on control difficulties, caused by the high nonlinearity of pneumatic systems, a robust control method must be applied. Sliding mode control was introduced in the late 1970's as a control design approach for the control of robotic manipulators.*

(Keywords: DSP, Sliding mode control, Pneumatic system, Positioning.)

### BEVEZETÉS

A munkánk célja az volt, hogy megismerjük a digitális jelfeldolgozó processzorok (DSP – Digital Signal Processor) működését, felépítését és programozását, mivel a digitális jelfeldolgozás az egyik leggyorsabban fejlődő ága a modern elektronikának. Célunk volt továb-

bá egy szabályozástechnikai feladat megoldása. Két módszert, a PID (Proportional Integral, Differential - arányos-integráló-differenciáló) szabályozást és az SMC (Sliding Mode Control – csúszó-mód szabályozást) alkalmaztunk a pneumatikus pozicionálás területén.

Az elmúlt század második felében számos szabályozási struktúra született, hogy túllépjenek a PID szabályozó korlátain. Ennek ellenére az ipari szabályozások 90 százalékában még napjainkban is, az egyszerű felépítésük és könnyű használatuk miatt, PID szabályozót használnak (Gao, 2001). Természetesen napjaink PID szabályozójának felépítése már jelentősen eltér a kezdeti idők analóg PID szabályozójától. Ma a PID szabályozók digitális elven működnek, és számos olyan algoritmust használnak, ami növeli a szabályozó teljesítményét és hatékonyságát (antiwind-up, auto-tuning, adaptive, fuzzy fine-tuning). A tisztán matematikai algoritmusok mellett megjelentek a mesterséges intelligencia módszerek (Mester, 1995).

A robusztus szabályozás elmélete a bizonytalanságokat kezelni képes rendszerek analizését és tervezését jelenti, különösen olyan körülmények között, ahol egzakt matematikai modellezés nem lehetséges. A múltja viszonylag rövid és még nem tekinthető lezárt elméletnek. A változó struktúrájú rendszerek és ehhez kapcsolódva a csúszó-mód szabályozás elméletét a Szovjetunióban dolgozták ki évtizedekkel ezelőtt. Az elmélet elsősorban V.I. Utkin és D.K. Young (1977) nevéhez fűződik.

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. 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 szabályozásmélet fejlődésének legújabb vívmányai is. Ennek eredményeként javultak a pozicionálási és pályakövetési tulajdonságok és a pneumatikus aktuátorok robottechnikai alkalmazásokra is alkalmassá váltak.

A kezdeti munkák a pneumatikus rendszerek modellezésében és szabályozásában az 50-es évekre vezethetők vissza Shearer (1956), Blackburn et al. (1960). A szervopneumatikus pozicionálás szabályozásának fejlődésén keresztül a modern szabályozástechnika fejlődését is nyomon követhetjük. A korai munkákban Shearer (1956), Burrows és Web (1966), Vaughan (1965) lineáris PID szabályozót használtak. Számos megoldás született az automatikus hangolású PID szabályozással. Fok és Ong, (1999) által elért pozicionálási pontosság  $\pm 0.3$  mm volt. Jeon et al. (1998) genetikus algoritmust használtak a pozíció-, sebesség- és gyorsulás visszacsatolású szabályozó optimális paramétereinek meghatározására. Dugattyúrúd nélküli munkahengerrel  $\pm 0.1$  mm pontosságot értek el. Wang et al. (1999) tanuló algoritmussal kiegészített PID szabályozót alkalmazott, az elért pontosság  $\pm 1$  mm. Wikander (1988) a nemlinearitás kompenzálásával 0.01 mm pozicionálási pontosságot is elért.

Fontos kutatási irány a sliding mode control (csúszó-mód szabályozás) alkalmazásának vizsgálata. Számos munka született a témában, például Song és Ishida (1997) továbbá Drakunov et al. (1997) foglalkoztak a csúszó-mód szabályozással és megmutatták, hogy a sliding mode control sikeresen használható a súrlódás kompenzálására. Az elért pontosság  $\pm 0.2$  mm.

A legtöbb javasolt megoldásnál az állandósult hiba nagyobb mint 0.1 mm és ez sem biztosított a dugattyú minden pozíciójában, illetve különböző nyomásértékeknél.

## A KÍSÉRLETTERVEZÉS ELMÉLETI HÁTTERE

A kísérleti berendezés elkészítése előtt meg kell ismerkedünk a felhasznált eszközökkel, a pneumatikával és az alkalmazott szabályozások elméletével.

### A pneumatika elméleti alapjai

A munkahenger (1. ábra) modelljének elkészítéséhez meg kell vizsgálni a levegő, fojtáson történő átáramlását, és el kell készíteni egy kamra töltésének modelljét (Elek, 1975).

Az áramlás leírásához négy jellemzőt kell az áramvonal mentén meghatározni:

- sebesség (*velocity*) ( $w$ );
- nyomás (*pressure*) ( $p$ );
- hőmérséklet (*temperature*) ( $T$ );
- sűrűség (*compactness*) ( $\rho$ ).

A négy jellemző meghatározásához négy egyenletet kell felírnunk:

$$\text{állapotegyenlet} \quad p \cdot v = R \cdot T, \quad (1)$$

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

$$\text{Euler-egyenlet} \quad w \cdot dw + \frac{dp}{\rho} = 0, \quad (3)$$

$$\text{folytonossági egyenlet} \quad A \cdot w \cdot \rho = \text{állandó}. \quad (4)$$

Az alapegyenletek figyelembevételével levezethető az összenyomható ideális sűrűdésmentes gázokra érvényes Bernoulli egyenlet, illetve egy tartályból csővezetéken kiáramló levegőre vonatkozó egyenlet.

Egy kamrában uralkodó nyomás meghatározásánál figyelembe kell venni:

- a térbe beáramló és az onnan kiáramló sűrített levegő mennyiségét ( $\dot{m}_{be}, \dot{m}_{ki}$ );
- a bevezetett illetve elvezetett hő mennyiségét ( $dQ_a, dQ_b$ );
- a kamra térfogatváltozásának hatását.

### 1. ábra

A munkahenger vázlata

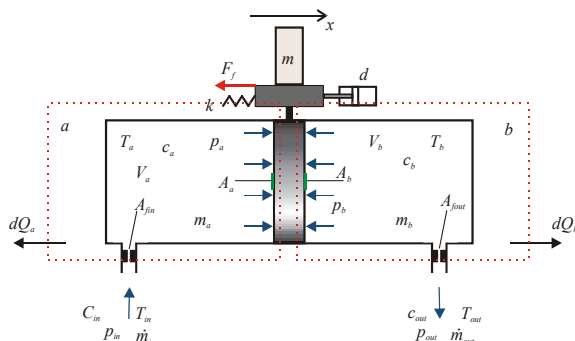


Figure 1: Structure of the pneumatic cylinder

Az energiaegyenlet kimondja, hogy egy rendszerben az energia nem veszt el, s nem is keletkezhet, csak átalakulhat. Azaz a tér egy vizsgált részében a be- és az elvezetett energia különbsége tárolódik. Az  $U=c_v \cdot m \cdot T$ ,  $h=c_p \cdot T$  és  $dU=c_v \cdot (dm \cdot T + dT \cdot m)$   $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$

összefüggések felhasználásával írjuk fel az energiaegyenletet a munkahenger  $a$  terére:

$$dU_a = dm_{be} \cdot \left( h_{be} + \frac{w_{be}^2}{2} \right) - dQ_a + W_a \quad (5)$$

ahol

$$dm_{be} \cdot \left( h_{be} + \frac{w_{be}^2}{2} \right) \quad \text{a beáramló levegő által bevitt energia (} h \text{ az entalpia),}$$

$$W_a = -p_a \cdot A_a \cdot x \quad \text{a levegő által végzett mechanikai munka,}$$

$$dQ_a \quad \text{a rendszer határán átlépő összes hőenergia.}$$

Az általunk végzett kísérletekben a levegő áramlási sebessége olyan mértékű, hogy a  $h_{be} = c_p \cdot T \gg \frac{w^2}{2}$  feltételezéssel élhetünk. Ha a továbbiakban a kinetikus energiát elhanyagoljuk az elkövetett hiba kisebb mint 2%. Ha a vizsgált kamra teljesen hőszigetelt, akkor  $dQ=0$  és adiabatikus állapotváltozásról beszélünk.

$$\frac{c_v(p_a \dot{V}_a + \dot{p}_a V_a)}{R} = c_p T_{in} \dot{m}_{in} - p_a A_a \dot{x} \quad (6)$$

Ebből a nyomásváltozás kifejezhető:

$$\dot{p}_a = RT_{in} \frac{c_p \dot{m}_{in}}{c_v V_a} - p_a A_a \frac{c_v}{c_v V_a} \dot{x} \quad (7)$$

Az energiaegyenletet a munkahenger  $b$  terére is felírva, a megfelelő behelyettesítéseket és egyszerűsítéseket elvégezve a hengertér nyomásfüggvénye meghatározható.

$$\dot{p}_b = p_a A_a \frac{c_p}{c_v V_a} \dot{x} - RT_b \frac{c_p \dot{m}_{out}}{c_v V_b} \quad (8)$$

Ahol

$$V_a = V_{a0} + A_a \cdot x$$

$$V_b = V_{b0} + A_b \cdot x$$

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

$$\dot{m}_{be} = \mu_{fa} \cdot p_{be} \cdot A_{fa} \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{be}}} \cdot \Psi \quad (9)$$

Ahol  $\mu_{fa}$  az átfolyási tényező, mely minden olyan hatást figyelembe vesz, mely az ideális viszonytól való eltérésekből adódik.

$$\text{Ha } p_a/p_{be} \leq 0.528 \quad \Psi = \left( \frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{1}{\chi-1}} \cdot \sqrt{\frac{\chi}{\chi + 1}} = 0.484 \quad (10)$$

$$\text{Ha } p_a/p_{be} > 0.528 \quad \Psi = \sqrt{\frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \left[ \left( \frac{p_a}{p_{be}} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left( \frac{p_a}{p_{be}} \right)^{\frac{1+\chi}{\chi}} \right]} \quad (11)$$

Atmoszférába való közvetlen kiáramlásra vonatkozóan a következő egyenleteket írhatjuk fel:

$$\dot{m}_{ki} = \mu_{fb} \cdot p_{ki} \cdot A_{fb} \cdot \sqrt{\frac{\chi}{R \cdot T_{ki}}} \Psi' \quad (12)$$

$$\text{Ha } p_b/p_{ki} \geq 1.885 \quad \Psi' = \left( \frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{\chi+1}{2(\chi-1)}} \cdot \frac{p_b}{p_{ki}} = 0.578 \cdot \frac{p_b}{p_{ki}} \quad (13)$$

$$\text{Ha } p_b/p_{ki} < 1.885 \quad \text{akkor } \Psi' = \sqrt{\frac{2}{\chi-1} \cdot \left( \frac{p_b}{p_{ki}} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \cdot \left[ \left( \frac{p_b}{p_{ki}} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} - 1 \right]} \quad (14)$$

Ezek alapján elkészíthetjük a feladat SIMULINK modelljét.

#### PID szabályozás

A jelentős átalakulás ellenére a **PID** szabályozási törvény változatlan maradt. A három hangolási paraméter ( $K_p, K_i, K_d$ ) fizikai összefüggésben áll a hibajellel ( $e$ ), és nincs szükség a szabályozott szakasz modelljére. Az **I** integráló hatás a múlt ( $\int edt$ ), a **P** arányos hatás a jelen ( $e$ ) és a **D** differenciáló hatás a jövő hibájával ( $\dot{e}$ ) arányos beavatkozó jelet szolgáltat.

$$u = K_p \cdot e + K_i \int edt + K_d \cdot \dot{e} \quad (15)$$

Az utóbbi időben jelentősen megnőtt az érdeklődés a nemlineáris szabályozástechnika iránt, ugyanis egyre olcsóbbak és egyre hatékonyabbak a szabályozóként használt digitális eszközök, így korábban az iparban szinte kizárólagosan használt PID (arányos integráló differenciáló) szabályozókat egyre bonyolultabb szabályozási algoritmusok váltják fel. Megfigyelhető az a tendencia is, hogy a drága precíziós mechanikát egyre olcsóbb, egyszerűbb és robusztusabb mechanikai szerkezetekkel helyettesítik, és az ebből adódó pontatlanságokat egyre bonyolultabb (nemlineáris, adaptív, robusztus) szabályozási algoritmussal küszöbölik ki. A népszerű PID szabályozók nem alkalmazhatóak a változó paraméterű és változó terhelésű nemlineáris rendszerekre. A terhelés változása, a munkahenger orientációja, lökete, a henger mérete és a henger és dugattyú közötti súrlódás csak néhány tulajdonság, amit negatívumként említhetünk a szervopneumatika kapcsán. A pneumatikus rendszer nemlinearitása miatt robusztus szabályozást kell alkalmazni.

#### SMC szabályozás

A szabályozás nagy előnye, hogy nem szükséges hozzá a rendszer pontos modelljének ismerete. Elegendő, ha egy egyszerűsített modell alapján mind a zavarok, mind a rendszer-paraméterek változásának korlátait ismerjük. A zavarérzékenység ára a végtelen nagy kapcsolási frekvencia, vagyis az ismételt gyors beavatkozás. Ebből következik, hogy a valóságban ideális csúszó-mód szabályozás nem létezik, de az a gyakorlati igénynek megfelelő módon megközelíthető.

Az erősítés a visszacsatoló ágban, két érték között változik, attól függően, hogy az adott pillanatban egy kijelölt állapotváltozó milyen értéket vesz fel. A kapcsolgató szabályozási függvény célja, hogy az állapotterben a nemlineáris szabályozott szakasz állapot trajektóriáját egy – a tervező által előre meghatározott – felületen végigvezesse és a nemlineáris szabályozott szakasz állapotváltozóit minden pillanatban a felületen tartsa. Ezt a felületet kapcsoló felületnek (switching surface) nevezzük. A visszacsatoló ág

erősítése más akkor, amikor a szabályozott szakasz állapot trajektóriája a kapcsolási felület „felett” van és más, amikor az állapot trajektória a kapcsolási felület „alatt” van. Ideális esetben, ha a szabályozott szakasz állapot trajektóriája eléri és átmetszi ezt a felületet, akkor a szabályozás az ezt követő időszakban a trajektóriát a csúszófelületen tartja és vezeti végig.

A csúszó-mód szabályozó megtervezése három fő lépésből áll.

Az 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 a csattogásmentes (chattering free) megvalósítás. Az első fázis kritikus a VSC tervezésében. Fontos, hogy megfelelően definiáljuk a kapcsoló felületet, mivel a szabályozott szakasz ezen a felületen halad végig. A második fázisban azt a kapcsoló szabályozást tervezzük meg, amely a szabályozott szakaszt a csúszófelületre vezeti, majd ott tartja ha a szabályozott szakasz trajektóriája a felületet átmetszette. Ehhez Ljapunov második, vagy direkt módszerét használjuk.

A legegyszerűbb szabályozó elem, amely a csúszó-módot megvalósíthatja, a relé.

$$u_i = k_i \cdot \text{sign}(s_i) \quad (16)$$

A csúszó-mód szabályozó robusztusságát a nagy (ideális esetben végtelen) körerősítésének köszönheti. Erről a relé gondoskodik. Fontos megjegyezni, hogy a valóságban csak véges kapcsolási frekvenciát tudunk megvalósítani. Ez a csattogás jelenségét (chattering) hozza magával. Ez azt jelenti, hogy a szabályozott szakasz állapot trajektóriája a csúszófelület egy kicsiny környezetében perturbál (2. ábra).

## 2. ábra

### Csúszó mód az állapottérben

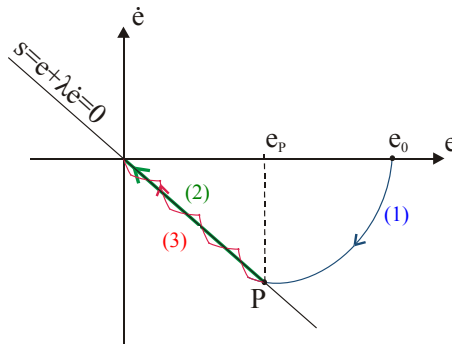


Figure 2: Sliding mode in the state space

Denotes the approaching phase(1), Denotes the sliding phase(2), Denotes the chattering(3)

Ahol (1) a megközelítés fázisa, (2) az ideális csúszó-mód és (3) a csattogás jelensége. A szabályozó realizálásánál figyelembe kell venni azt, hogy ez a perturbáció esetleg nem kívánt jelenségeket okoz a szabályozott szakaszban.

A megközelítési fázisban a rendszer érzékeny a paraméter változásokra, illetve a külső zavarásokra. Amikor a rendszer csúszó-módba kerül, dinamikáját a csúszófelület

határozza meg, és ekkor érzéketlenné válik a paraméter változásokkal, illetve a külső zavarásokkal szemben. Tervezéskor két ellentétes szempontot kell szem előtt tartani: a rendszer trajektóriája minél rövidebb idő alatt érje el a csúszóegyeneset, és a csattogást minél inkább elimináljuk. A kutatók nagy energiát szenteltek a kérdés megoldására. *Young et al.* (1987) a megközelítés idejét a visszacsatoló ág erősítésének növelésével csökkentették, de ez fokozta a csattogást. A csattogás csökkentésére *Slotin* (1984) valamint *Yeung és Chen* (1988) határrejteget képzett a csúszóegyenes mentén. *Hwang és Lin* (1992), *Lin és Kung* (1992), valamint *Lin és Chen* (1994) fuzzy logika alkalmazásával csökkentették a csattogást.

A csúszó-módról jó bevezetés találunk *Korondi et al.* (1999) és *Jeon et al.* (1998) munkáiban. Tegyük fel, hogy rendszerünket egy másodrendű differenciálegyenlet írja le:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, u) \quad (17)$$

Ahol  $x(t)$  a rendszer kimenete, a beavatkozó jelet jelölje  $u(t)$ , mely jel az  $x(t)$  kimenőjelet arra kényszeríti, hogy kövesse az  $x_d(t)$  referencia jelet. A követési hibát jelöljük  $e(t)$ -vel. A rendszert akkor gyorsítjuk, ha állapota lemaradt a tervezett trajektóriától és akkor lassítjuk, ha megelőzi azt. A következő kérdés az, hogy miként tervezzük meg a hibajel trajektóriáját, és hogyan határozzuk meg a rendszer tényleges állapotának távolságát a tervezett trajektóriától, vagyis azt, hogy mikor kell gyorsítani, illetve lassítani a rendszert. A klasszikus csúszó-mód szabályozásnál (*Yin et al.*, 1998) a hibajel ( $e$ ) és deriváltjának ( $\dot{e}$ ) lineáris kombinációjával definiálunk egy olyan skalár változót, amely úgy értelmezhető, mint a rendszer állapotának előjeles távolsága egy hiperfelülettől ( $n=2$  esetben egyenestől).

$$s = e + \lambda \cdot \dot{e} \quad (18)$$

A (18) egyenlet a fázisikon egy  $-1/\lambda_i$  meredekségű egyenest határoz meg. Ezért szokás csúszóegyenesről beszélni. A 2. ábrán egy képzeletbeli trajektóriát is berajzoltunk. A  $t=0$  időpontban a kezdeti értékek:  $e=e_0$  és  $\dot{e}=0$ .

Ahol  $\lambda$  egy időállandó típusú konstans paraméter. A megközelítési fázisban az (19) feltétel

$$s(\dot{e}, e) \cdot \dot{s}(\dot{e}, e) < 0 \quad (19)$$

kielégítésével tudjuk a hiba-trajektóriát a csúszó felület felé vezetni. A csúszási fázisban létezik egy folytonos jel, az ún.  $u_{eq}$  egyenértékű (ekvivalens) szabályozójel, amely a csúszófelületen tudja tartani a rendszert, (de nem feltétlenül gondoskodik arról, hogy az állapottrajektória csúszófelülethez konvergáljon, ha az, attól távol van). A két szabályozási törvényt külön-külön kell megtervezni.

Csúszó-módról akkor beszélünk, ha a rendszer állapota a csúszó felület mentén változik:

$$s(\dot{e}, e) = 0 \quad (20)$$

A csúszó-módban történő szabályozáskor az a feladat, hogy a beavatkozójelet mindig úgy kapcsoljuk, hogy a (19) feltétel minden időpillanatban teljesüljön. A szabályozott szakaszról és a zavarásról csak annyi információval kell rendelkezni, hogy adott beavatkozójelet mellett a (19) feltétel megléte egyértelműen eldönthető legyen.

Általában a negatív visszacsatolás miatt a hibajel fázisában az origó egy meghatározott környezetén belül az  $u_b$  beavatkozójelet és az  $\dot{s}$  előjele ellentétes. Így gyakran elegendő egy olyan relés szabályozót alkalmazni, amelyik az  $s$  skalár változó előjelétől függően kapcsolgatja az  $u_b$  beavatkozójelet:

$$u_b = \delta \cdot \text{sign}(s), \quad (21)$$

ahol  $\delta$  a szabályozó körerősítése által meghatározott pozitív konstans.

A csúszó egyenes meredekségének megválasztásakor két egymás ellen ható követelmény között kell az optimumot megtalálni. Minél kisebb az egyenes meredeksége, annál hamarabb éri el a trajektória a csúszó egyenest, de annál lassabb az egyenes mentén a beállítás. Jeon et al. (1998) a gyorsaság és a robusztusság követelményének együttes kielégítése érdekében a csúszó egyenes meredekségének adaptív változtatását javasolják.

### A KÍSÉRLETI BERENDEZÉS ISMERTETÉSE

Ahhoz hogy az elméleti megfontolásokat kísérletekkel is alátámasszuk, szükség volt egy olyan pneumatikus pozicionáló szerkezet elkészítésére, mely alkalmas kutatási munkánkhoz szükséges mérések és kísérletek elvégzésére. A berendezéssel szemben támasztott követelmények (Gyeviki, 2004):

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

A 3. ábrán látható kísérleti berendezés fő részei: MECMAN 170 típusú 32 mm átmérőjű, 500 mm löketű siklóhenger, melyet egy FESTO MPYE-5-1/8 HF-010B típusú arányos szeleppel vezérelünk. A dugattyú pozícióját egy LINIMIK MSA 320 típusú inkrementális útdadóval mérjük. A sebességet és a gyorsulást számítjuk. A kamrák nyomásának mérése nyomás-távadókkal történik.

### 3. ábra

#### Kísérleti berendezés

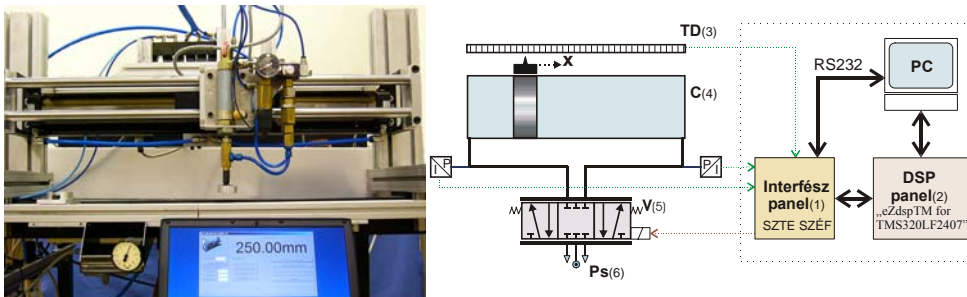


Figure 3: The experimental positioning system

Interface board(1), DSP board(2), Linear transducer(3), Rodless cylinder(4), Servo-valve(5), Air supply(6)

A berendezés alkalmas függőleges orientációjú munkahengerrel (4. ábra), tömeg- és rugó terheléssel végzett kísérletekre is (Gyeviki, 2004).

A pneumatikus rendszerek nemlinearitása által okozott szabályozási nehézségek miatt egy DSP bázisú csúszó-mód szabályozót terveztünk. Kísérleteinkhez a Spectrum Digital „eZdspTM for TMS320LF2407” DSP kártyáját használtuk. A DSP kezdő-készlet (DSK) a PC paralel portjához kapcsolható, melyen keresztül letölthető a program a DSP-

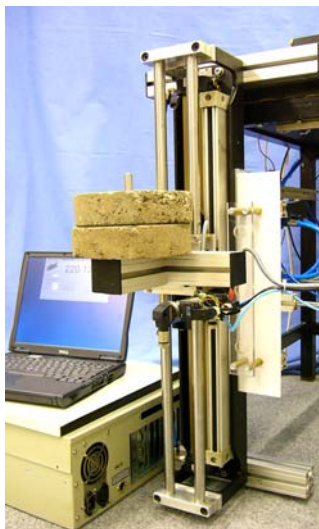


be, illetve ezen keresztül lépésenként ellenőrizhető a letöltött program. A szabályozó programot „C” nyelven készítettük.

Az eZdsp™ LF2407 Starter Kit meghatározó része egy TMS320LF2407-es DSP melyet a Texas Instruments forgalmaz. A modul kiváló lehetőséget biztosít, hogy megismerjük a DSP-t és kisebb alkalmazásokat fejlesszünk.

#### 4. ábra

##### Függőleges pozicionálás



*Figure 4: Vertical positioning*

Ahhoz hogy a DSP-t szabályozástechnikai feladatok ellátására használjuk, a kimenetek és bemenetek illesztésére van szükség úgy hogy, azok kompatibilisek legyenek a külső eszközök jelszintjével (Csiszár *et al.*, 2004). Az általunk kiválasztott szabályozástechnikai feladat egy pneumatikus munkahenger pozíció szabályozása. Ennek megfelelően terveztük meg az illesztő-panelt (5. ábra).

A DSP analóg bemeneti és digitális ki- és bemeneti interfésszel rendelkezik. A kísérletünk során szükség volt még analóg kimeneti jelekre is, ezeket D/A konverterrel állítottuk elő. A digitális kimeneti jelszint illesztését relével, a bemenet optikai csatolóval oldottuk meg. A kiegészítő áramkör elkészítésénél szükség volt még a számítógéppel és különböző ipari eszközökkel való kapcsolattartásra.

Kísérleteink során a pozíció érzékelésre egy 0.01 mm-es pontosságú (LINIMIK MSA 320 típusú) inkrementális útdátó, a pontosabb 0.001 mm-es mérésekhez pedig Balluff BTL5-S101 abszolút útdátó használtunk.

Az általunk választott Balluff távadóval RS485 vagy RS422 soros vonalon kommunikálhatunk. A DSP digitális kimenete, bemenete és az RS485 soros vonal közötti illesztést egy MAX488 típusú IC-vel oldottuk meg.

A számítógéppel való kommunikáció kialakítására leggyakrabban a RS232 kommunikációt alkalmazunk. A DSP és a számítógép közötti RS232-es kommunikációt egy ICL3232IBN integrált áramkörrel valósítottuk meg.

5. ábra

A DSP panel és a illesztő-panel kapcsolata

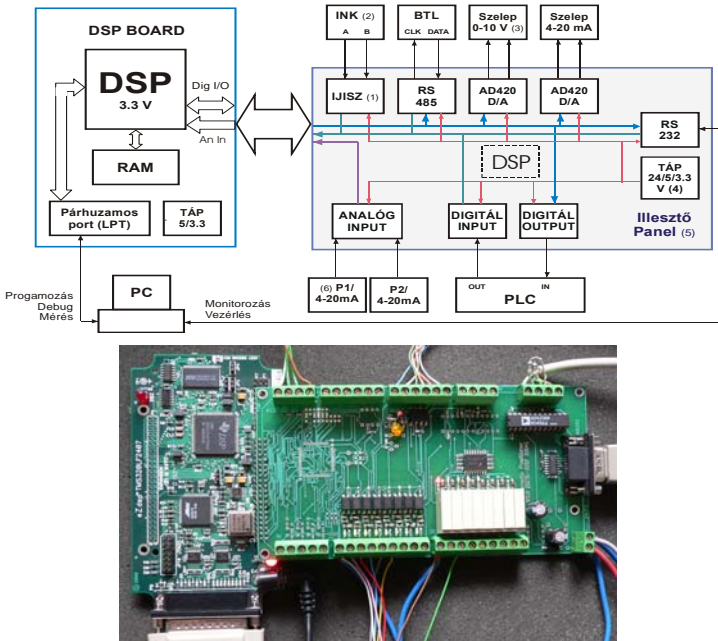


Figure 5: Connection between the DSP Board and interface circuit

A pozíció szabályozásánál nagy hangsúlyt kap a pozíció pontos mérése és gyors beolvasása. A feladat megoldása során mi a DSP saját fejlesztő rendszerét a Code Composer-t alkalmaztunk. A program a DSP egy kimenetét és egy bemenetét használja a szinkron soros kommunikáció kialakítására. A kimenet a BTL útdónak a szinkron jelet adja, a bemenet az útdától jövő adatot fogadja.

**EREDMÉNY ÉS ÉRTÉKELÉS**

A pneumatikus pozicionálási kísérleteink során két szabályozás viselkedését vizsgáltuk. Ezért a PID és az SMC szabályozás mérési eredményeit vetjük össze.

A kísérletek során a nyomás értéke 6 bar, a mintavételezési idő pedig 2 ms volt. A kísérleti eredmények valós idejű gyűjtésére egy adatgyűjtő programot készítettünk, mely egy kommunikációs interfészen keresztül a DSP-ből a PC-be juttatja a mért értékeket. A szabályozó program a DSP programmemóriájában helyezkedik el, így a szabályozás a PC-től függetlenül működik. Mivel a DSP nagy működési sebességgel rendelkezik a mintavételezési frekvencia és a pontosság növelhető. A DSP alkalmas az inkrementális jeladó jelének, illetve analóg és digitális jelek fogadására. A mérés során egy jól behangolt PID szabályozóval és egy csúszó-mód szabályozóval végeztünk összehasonlító kísérleteket.

A pozicionálási időfüggvények a 6. és 8. ábrákon láthatóak. PID szabályozó esetén jelentős 16.3 mm-es túllendülést mértünk. A jól ismert csúszás-megakadás jelensége miatt az állandósult állapotbeli hiba is jelentős: 3.8 mm. A DSP bázisú csúszó-mód szabályozás pozicionálási hibája kisebb, mint 0.01 mm. Ez kisebb mint 1%-a a jól

behangolt PID szabályozó pozicionálási hibájának. A csúszó egyenes meredekségét jelentő időállandót 0.08 sec-ra választottuk. A fázisrajekatóriákat a 7. és a 9. ábrákon láthatjuk. Az 0.01 mm felbontású inkrementális jeladóval csak azt tudtuk megállapítani, hogy a pozicionálási hiba 0.01 mm alatt van. Ahhoz hogy a tényleges pozicionálási pontosságot meg tudjuk határozni, egy BLT5-S101 típusú, 0.001 mm felbontású útdátó (Balluff) építettük be a kísérleti berendezésünkbe. A szabályozás finomításával elértük a 10. ábrán látható a pozicionálási pontosságot. A 11. ábrán kinagyítva láthatjuk a túllendülés mértékét, illetve az állandósult hibát. A túllendülés mértéke 0.3 mm alatt, a pozicionálás hibája pedig 1  $\mu$ m alatt van.

6. ábra

**Pozicionálás PID szabályozóval**

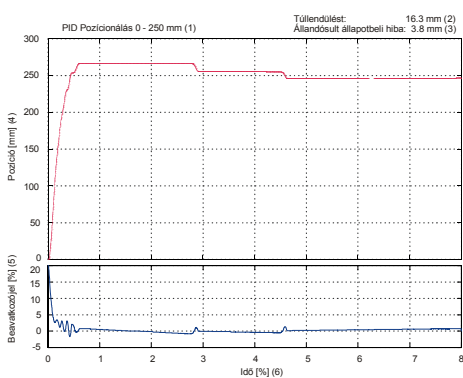


Figure 6: Positioning with PID

7. ábra

**PID szabályozás fázis-trajektóriája**

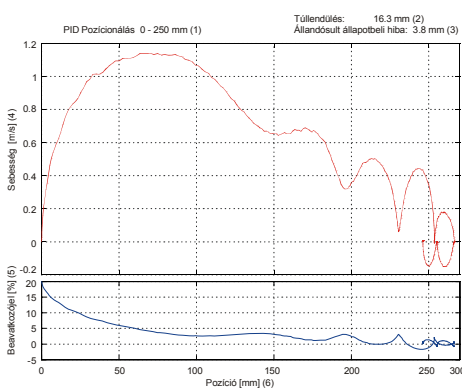


Figure 7: Phase-plot trajectory of PID

8. ábra

**Pozicionálás SM szabályozóval**

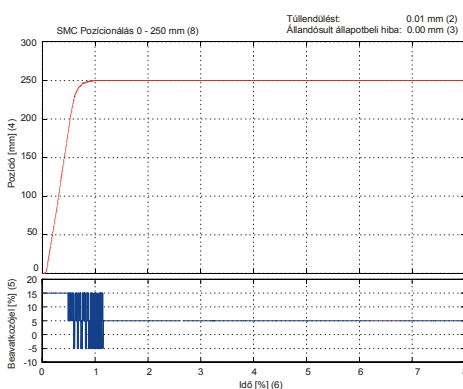


Figure 8: Positioning with SMC

9. ábra

**SM szabályozás fázis-trajektóriája**

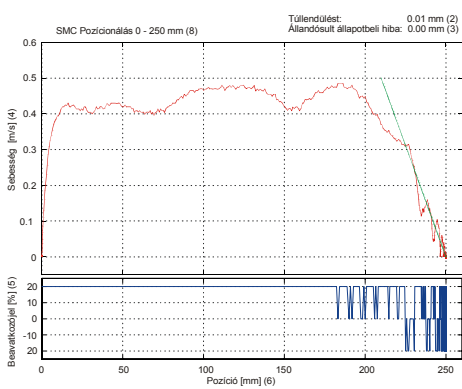


Figure 9: Phase-plot trajectory of SMC

*PID positioning(1), Overshoot(2), Steady state error(3), Position(4), Control signal(5), Time(6), Velocity(7), SMC positioning(8)*

10. ábra

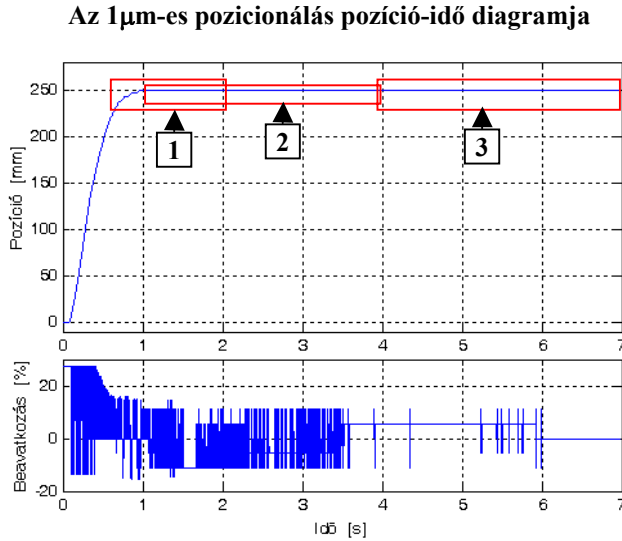


Figure 10: Diagram of the 1  $\mu$ m positioning

11. ábra

**1 $\mu$ m-es pozicionálás pozíció-idő diagramjának részletei**

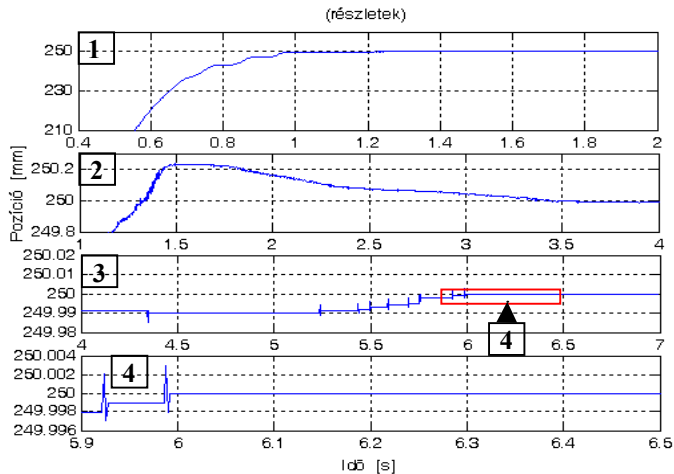


Figure 11: Details of position-time diagram of the 1  $\mu$ m positioning

**ÖSSZEFOGLALÁS**

A laboratóriumi kísérletek alapján megállapíthatjuk, hogy a DSP alapú csúszó-mód szabályozás alkalmas a pneumatikus munkahengerek szabályozására, ugyanis kellően

gyors, robusztus a külső zavarásokkal és belső paraméter-változásokkal szemben. Fontos annak a hangsúlyozása is, hogy a szabályozáshoz nem szükséges a rendszer pontos modelljének ismerete.

## IRODALOM

- Blackburn, J.F., Rethof, G., Shearer, J.L. (1960). Fluid Power Control. MIT Press : Cambridge, MA.
- Csiszár, A., Varga, A., Kovács, E. (2004). Servo-pneumatic positioning with sliding mode control (SMC). International Student Experimental Hands-on Project Competition via Internet on Intelligent Mechatronics and Automation, Taiwan
- Drakunov, S., Hanchin, G.D., Su, W.C., Özgüner, Ü. (1997). Nonlinear control of rodless pneumatic servoactuator, or sliding mode versus coulomb friction. In: Automatica, 33. 7. 1401-1408.
- Elek, I., Hudáky J. (1975). Az ipari pneumatika alapjai. Interpress Kiadó : Budapest
- Fok, S.C., Ong, E.K. (1999). Position control and repeatability of a pneumatic rodless cylinder system for continuous positioning. In: Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 15. 365-371.
- Gao, Z., Yi, H., Han, J. (2001). An alternative paradigm for control system design. In: Proc. of IEEE Conference on Decision and Control
- Gyeviki, J., Tóth, I.T., Rózsahegyi K. (2004) Sliding mode control and its Application on a Servopneumatic Positioning System. In: Transactions on AUTOMATIC CONTROL and COMPUTER SCIENCE 49. 63. 2004. 99-103.
- Gyeviki, J. (2004) Improving Positioning Accuracy of Pneumatic Systems. In: Gép/A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, 55. 9. 7-9.
- Hwang, G.C. and Lin, S.C. (1992). A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems. In: Fuzzy Sets and Systems, 48. 279-287.
- Jeon, Y., Lee, C. and Hong, Y. (1998). Optimization of the control parameters of a pneumatic servo cylinder drive using genetic algorithms. In: Control Engineering Practice, 6. 847-853.
- Korondi, P., Hashimoto, H., Utkin V., (1998). Direct Torsion Control of Flexible Shaft based on an Observer Based Discrete-time Sliding Mode. In: IEEE Trans. on Industrial Electronics IE-2. 291-296.
- Korondi, P., Hashimoto, H., (2000). Sliding Mode Design for Motion Control. In: Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 16. 1-12.
- Korondi, P., Hashimoto, H. (1999) Park Vector Based Sliding Mode Control. In: Variable Structure System, Robust and Nonlinear Control. K.D.Young, Ü. Özgüner (eds.), ISBN: 1-85233-197-6, Springer-Verlag.
- Lin, S.C., Kung, C.C. (1992). The fuzzy-sliding mode controller, In: Proceedings of the 15<sup>th</sup> National Symposium on Automatic Control R.O.C., 359-366.
- Lin, S.C., Chen, Y.Y. (1994). Design of adaptive fuzzy sliding mode for nonlinear system control. In: Proceedings of Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems USA, 35-39.
- Mester, Gy. (1995). Neuro-Fuzzy-Genetic Controller Design for Robot Manipulators. In: Proc. IECON'95, IEEE, Orlando, Florida, USA, 1. 87-92.
- Mester, Gy. (1995). Neuro-Fuzzy-Genetic Tracking Control of Flexible Joint robots. In: Proc. I.Intern.Conf. on Adv. Robotics & Intelligent Aut. Athens, Greece 93-98.
- Shearer, J.L. (1956). Study of pneumatic process on the continuous control of motion with compressed air. In: Transactions of ASME, 78. 233-249.

- Slotine, J.J., (1984). Sliding controller design for non-linear systems. In: Int. J. Control, 40. 421-434.
- Song, J. and Ishida, Y., (1997) Robust sliding mode control for pneumatic servo systems. In: International Journal of Engineering Science, 35. 8. 711-723.
- Utkin, V., (1977). Variable Structure Systems with Sliding Mode. In: IEEE Trans. AC-22. 2. 212-222.
- Wang, J., Pu, J. and Moore, P. (1999). Accurate position control of servo pneumatic actuator systems: an application to food packaging. In: Control Engineering Practice, 7. 699-706.
- Wikander, J., (1988). Adaptive Control of Pneumatic Cylinders. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1988, ISSN 0282-0048, TRITAMAE-1988-7
- Yeung, K.S. and Chen, Y.P., (1988) A new controller design for manipulators using the theory of variable structure systems. In: IEEE Trans. on Automatic Control, AC-33. 200-206.
- Young, K.D., (1987). Controller Design for Manipulator using Theory of Variable Structure Systems. In: IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics, SMC-8. 101-256.
- Yin, Y. and Araki, K. (1998). Modelling and analysis of an asymmetric valvecontrolled single-acting cylinder of a pneumatic force control system. In: Proceedings of the SICE Annual Conference, 109.

Levelezési cím (*Corresponding author*):

**Gyeviki János**

Szegedi Tudományegyetem Élelmiszeripari Főiskolai Kar  
H-6724 Szeged, Mars tér 7.

*University of Szeged, Technical and Informatic Department  
H-6724 Szeged, Mars tér 7.*

Tel.: 36-62-426-549, Fax: 36-62-420-991

e-mail: gyeviki@szef.u-szeged.hu