

# Deformálható elemen keresztül hajtott dinamikai rendszer RFPT alapú adaptív szabályozása<sup>\*</sup>

Kósi Krisztián<sup>\*</sup> Várkonyi Teréz Anna<sup>\*\*</sup> Tar József<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatikai Doktori Iskola, H-1034  
Budapest, Bécsi út 96/B (e-mail: kosi.krisztian@phd.uni-obuda.hu)

<sup>\*\*</sup> Óbudai Egyetem, Bejczy Antal iRobottechnikai Központ, H-1034  
Budapest, Bécsi út 96/B (e-mail: varkonyi.teri@phd.uni-obuda.hu)

<sup>\*\*\*</sup> Óbudai Egyetem, Bejczy Antal iRobottechnikai Központ, H-1034  
Budapest, Bécsi út 96/B (e-mail: tar.jozsef@nik.uni-obuda.hu)

---

Kivonat A járművek irányításának a gyakorlatban jelenleg tipikus megoldása, hogy a dinamikai szabályozás közvetlenül a viszonylag nagy tömegű járműtestre koncentrál, melyhez a szállított teher csillapított, rugalmas szerkezeti elemeken keresztül van csatolva. Maga a hasznos teher nem kap aktív szabályozást, dinamikai csatolása a járműtesttel a jármű mozgásának perturbációjaként jelenik meg. A szállított teher rázkódása emiatt nem szabályozott, s csak a rendszerben meglévő természetes csillapítások hatására korlátozódik. Tekintettel arra, hogy a ma már olcsón hozzáférhető gyorsulás-szenzorok közvetlenül képesek mérni egy test inerciális vonatkoztatási rendszerekhez viszonyított, a Klasszikus Mechanika modellvilágában ily módon „abszolút” gyorsulást, alternatív lehetőség lehet magának a szállított tehernek az aktív mozgásszabályozása abban az értelemben, hogy a járműtestet próbáljuk meg úgy mozgatni, hogy ne a járműtest, hanem a teher mozgása legyen minél simább.

Mivel a deformált elem által kifejtett erő a deformáció mértékétől függ, csak a szállított teher koordinátáinak negyedik idő szerinti deriváltjának közvetlen befolyásolására van módunk. Ennek szabályozását nehezíti, hogy a 4. deriváltak a szimulációs eszközökben (pl. MATLAB, SCILAB) meglévő szokványos deriváló elemekkel általában megbízhatatlanul becsülhetők. E nehézséget küzdöttük le egy saját fejlesztésű polinomiális deriválóval, amely alkalmas különböző módszerekkel numerikusan integrált jelek 4. deriváltjának megbízható becslésére, s egyúttal zajszűrőként is működik.

Másik probléma, hogy a szabályozott rendszer dinamikájáról csak nagyon pontatlan ismereteink vannak, ezért sima szabályozáshoz adaptív technikák alkalmazása válhat szükségessé, amelyek kimunkálása a globális stabilitást biztosító Lyapunov függvény technika alapján matematikailag nehéz. Ennek alternatívájaként vezettük be a *Stefan Banach fixpont tételén* alapuló, *Robusztus Fixpont Transzformációt* alkalmazó adaptív szabályozást, amely csak korlátos tartományon garantál stabilitást.

Egy 2 szabadsági fokú rendszer példáján már demonstráltuk, hogy a polinomiális deriválóval kombinálva ez a módszer működik a 4. deriváltakat igénylő dinamikai szabályozásban. Tovább lépésként most egy 6 szabadsági fokú rendszerre mutatjuk meg szimulációval a módszer használhatóságát. További célunk, hogy ezen eredményeken továbblépve több rugalmas elemmel rögzített teher közvetlen adaptív mozgásszabályozásáig jussunk el.

---

## 1. BEVEZETÉS

A mai általános gyakorlatban a nemlineáris adaptív szabályozók tervezésének alapja „Lyapunov 2. módszere”, melyet 1892-ben doktori értekezésében publikált Lyapunov [1892] a különböző fizikai rendszerek mozgásának stabilitásáról, majd a múlt század hatvanas évében megjelenő angol fordítás Lyapunov [1966] alapján terjedt el az egész világon.

<sup>\*</sup> TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012: Hibrid és elektromos járművek fejlesztését megalapozó kutatások - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Módszerének nagy előnye, hogy olyan fizikai rendszerek mozgásának stabilitását (gyakorta aszimptotikus stabilitását is) meg lehet vele állapítani, melyek mozgásegyenletének nincs zárt alakú analitikus megoldása, s így részletei általában ismeretlenek. A tervezési módszer alkalmazására számtalan „régibbi” (a múlt század kilencvenes éveiből eredő) és újkeletű példa is idézhető, pl. az „Adaptív Inverz Dinamika”, „Slotine és Li Robotszabályozója” Slotine and Li [1991], Isermann et al. [1992], a referencia modellhez hasonlító dinamikai viselkedést eredményező „Modell Referenciás Adaptív Szabályozók” (pl. Nguyen et al. [1993], Murray et al. [1994], Kamnik et al. [1998], Tung et al.

[2000], Somló et al. [2002], Khoh and Tan [2003], Hosseini-Suny et al. [2010]). A múlt század kilencvenes éveitől világossá vált, hogy e módszer nemcsak *analitikus formájú kiindulási modellre*, hanem a lágy számítási eljárásokkal megadott modellek re is kiterjeszhető Bernard and Slotine [1997]). Ez igen fontos lépés volt, mivel a szabályozásméletben a fuzzy következtető rendszerek is egyre inkább elterjedtek (pl. Tick and Fodor [2005]). Azonosíthatók jellegzetes alkalmazási területek, melyeken a „*situáció alapú szabályozás*” (pl. Madarász et al. [2009], Madarász et al. [2010], Andoga et al. [2013]) elvei érvényesíthetők, mivel tipikus működési rezsimek azonosíthatók valamilyen eszköz esetében, melyekre hierarchikus szabályozás dolgozható ki szabálybázis alapján (az idézett példában turbojet motorban).

Erényei mellett a Lyapunov által kifejlesztett technikának hátrányai is vannak:

- A módszer egy alkalmas Lyapunov függvény megtalálásán alapul. Ha nem sikerül ilyen találni, a rendszer stabilitásáról semmit sem állíthatunk.
- A megfelelő Lyapunov függvény megtalálása „intuíción” alapulhat, s nem váltható ki *mindig* egy egyszerű, könnyen programozható algoritmussal.
- Az *adaptív szabályozóba* bekerülhetnek a Lyapunov függvény alkatrészeinek „törmelékei”, így sok és nehezen optimalizálható szabályozót kapunk, a módszer evolúciós módszerekkel is kényszerűségből kombinálható lehet (pl. Sekaj and Veselý [2005]).
- Az *elsődleges tervezői szempont* a pályakövetési hiba időbeni csökkenésének pontos előírása lenne, erre a Lyapunov módszer nem közvetlen információt, alkalmazásával szimulációs vizsgálatokra vagyunk utalva.
- A *globális stabilitás* igénye a gyakorlatban *túlzó*, a modern robusztus szabályozókat is általában véges feltételezett hiba-tartományra tervezik, korlátlan hibák tolerálása általában nem várható el a szabályozóktól.

A fent említett körülmények arra ösztönöztek, hogy alternatív tervezési megoldást keressünk az adaptív szabályozók stabilitásának biztosítására, amely

- jóval egyszerűbb Lyapunov módszerénél,
- csupán kevés független paramétert tartalmaz,
- geometriailag egyszerűen interpretálható,
- viszonylag *pontatlan és hiányos kiindulási modell* esetében is képes működni,
- nem törekszik fölöslegesen a *globális stabilitás* biztosítására,
- stabilitása azonban véges tartományokon garantálható,
- az elsődleges tervezői szándékot tartja szem előtt, s előírt hibacsökkenést eredményez.

A módszer alapjait 2009-ben (Tar et al. [2009]) raktuk le egy iteratív szabályozással, amely *Stefan Banach fixpont tételén* Banach [1922] alapulva lépésről lépésre deformálja a közelítő modell bemenetét oly módon, hogy végül igen pontos pályakövetési hibát kapjunk (a kauzalitás elve miatt ezzel a módszerrel *aszimptotikusan stabil* szabályozó nem nyerhető, de véges tartományban stabil szabályozó már igen. Ez a módszer feltételezi, hogy a szabályozott dinamikai rendszer *válasza* (és nem a teljes állapota) közvetlenül megfigyelhető, így lehetővé teszi *válaszfüggvény* létét,

amely egy *kívánt választ* képez le egy *megfigyelt válaszra*. A módszert sokféle fizikai rendszer esetében alkalmazhatóan találtuk, s segítségével a *Modell Referenciás Adaptív Szabályozók* egy új osztályát fejlesztettük ki (pl. Tar and Eredics [2010], Tar et al. [2013]). A véges tartományon garantált konvergencia gyengéjének orvoslására kiegészítő hangolási módszereket dolgoztunk ki egyetlen adaptív paraméterre a transzformáció *lokális tulajdonságai* alapján (pl. Tar [2010], Tar et al. [2011]). A transzformáció *globális tulajdonságainak* vizsgálata alapján megmutattuk, hogy a konvergencia tartományának elhagyása nem okvetlenül jár tragikus tulajdonságokkal (pl. Várkonyi et al. [2012], Kósi et al. [2012], Kósi et al. [2012]). Végül a módszert sikeresen kombináltuk *soft computing alapú* modellekkel Várkonyi [2012], Várkonyi et al. [2013], és a magasabb rendű numerikus deriválás problémáját megoldva egy *két szabadsági fokú, 4. rendű rendszerre* meg tudtuk mutatni, hogy a módszer használható lehet Kósi et al. [2013].

A fenti kezdeti eredményeken felbuzdulva igyekeztünk a módszer használhatóságát vizsgálni olyan *közelítően modellezhető mechanikai rendszerek* adaptív szabályozásában, ahol a szabályozandó rendszer mozgatása nem közvetlenül történik, hanem deformálható komponenseken keresztül. Tipikusan ilyen helyzettel állunk szemben járművek irányítása esetén, ahol a cél a hordott teher precíz mozgatása, közvetlenül viszont csak a járműtest mozgását tudjuk szabályozni. Ez a legegyszerűbb esetben 4. rendű szabályozásnak felel meg. Az alábbiakban a módszer használhatóságát egy 6 szabadsági fokú rendszeren mutatjuk be szimulációval, a mely a járműszabályozási probléma legegyszerűbb modellje.

## 2. A SZABÁLYOZANDÓ RENDSZER MODELLJE

Legyen két pontszerű tömegünk,  $m_x$  és  $m_y$  az  $\mathbf{x}$  és  $\mathbf{y}$  pontokban egy  $L_0$  nyugalmi hosszú rugóval összekötve oly módon, hogy a rugó csak a maga irányában legyen képes erőt kifejteni, azaz csak az  $\mathbf{y} - \mathbf{x}$  irányban. A  $m_y$  tömegpontra közvetlenül tudunk  $\mathbf{F}$  erőt kifejteni, amellyel viszont célunk az  $m_x$  tömegpontot az  $\mathbf{x}^N(t)$  *nominális pályán* végigvezetni. E rendszer mozgásegyenlete az alábbi:

$$\begin{aligned} m_x \ddot{\mathbf{x}} &= m_x \mathbf{g} + \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{y}}) \\ m_y \ddot{\mathbf{y}} &= m_y \mathbf{g} - \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{y}}) + \mathbf{F}, \end{aligned} \quad (1)$$

ahol a tömegpontok közti kölcsönhatásban figyelembe vettük a *hatás-ellenhatás elvét*,  $\mathbf{g}$  a gravitációs gyorsulást jelöli, a két test közti kölcsönhatást pedig az alábbi függvények írják le:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &:= \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|, \\ \mathbf{h} &:= k \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}}{\mathcal{N}} (\mathcal{N} - L_0), \\ \mathbf{H} &:= b \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}}{\mathcal{N}} \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{x})^T (\dot{\mathbf{y}} - \dot{\mathbf{x}})}{\mathcal{N}}, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol  $k > 0$  egy rugóállandó,  $b > 0$  pedig egy viszkózus csillapítás,  $\mathcal{N}$  pedig eukleidészi (Frobenius) normát jelöl. A viszkózus csillapításról is feltettük, hogy csak az  $\mathbf{y} - \mathbf{x}$  irányban fejt ki erőt, ami csak az ezirányú nyúlástól függ a  $\frac{(\mathbf{y} - \mathbf{x})^T (\dot{\mathbf{y}} - \dot{\mathbf{x}})}{\mathcal{N}}$  tényező szerint. Előre várható, hogy a kölcsönhatási erő ilyen iránybeli korlátozottsága speciális szabályozást igényel, amelyre a következő szakaszban teszünk javaslatot.

### 3. A JAVASOLT SZABÁLYOZÁS

Először egy pontosnak vélt modell alapján kidolgozott nem adaptív, majd egy közelítő modellen alapuló adaptív szabályozásra teszünk javaslatot.

#### 3.1. A pontos modellen alapuló szabályozás

Tegyük fel, hogy a rugóállandó hatása mellett a viszkózus csillapításhoz köthető kölcsönhatás viszonylag csekély! Tisztán kinematikai alapon írjunk elő egy PID típusú követési hiba relaxációt az  $\mathbf{x}$  változóra a következőképp:

$$\begin{aligned} \zeta(t) &:= \int_0^t (\mathbf{x}^N(\xi) - \mathbf{x}(\xi)) d\xi \\ &\left( \Lambda + \frac{d}{dt} \right)^3 \zeta = 0 \Rightarrow \\ \ddot{\mathbf{x}}^{Des} &= \ddot{\mathbf{x}}^N + \Lambda^3 \zeta + 3\Lambda^2 (\mathbf{x}^N(t) - \mathbf{x}(t)) + \\ &3\Lambda (\dot{\mathbf{x}}^N(t) - \dot{\mathbf{x}}(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

ahol  $\ddot{\mathbf{x}}^{Des}$  egy kívánt gyorsulás. A modell ismeretében az  $\mathbf{x}^N(t)$  nominális pályához tervezhetünk egy nominális pályát az  $\mathbf{y}$  változóra oly módon, hogy az  $m_x$ -re ható erő irányában álljon az  $\mathbf{y} - \mathbf{x}$  vektor, a rugó pedig legyen annyira megnyújtva, hogy az  $m_x$  tömegpont kívánt gyorsulását okozza. Ha a viszkózus kölcsönhatást elhanyagoljuk, az alábbi előírást kapjuk:

$$m_x (\ddot{\mathbf{x}}^{Des} - \mathbf{g}) = k \frac{\mathbf{y}^N - \mathbf{x}}{\mathcal{N}} (\mathcal{N} - L_0) \quad (4)$$

ahol azonban  $\mathcal{N} = \|\mathbf{y}^N - \mathbf{x}\|$  is tartalmazza a keresett  $\mathbf{y}^N$  változót. A (4) egyenlet megoldása mégsem nehéz. Ahhoz, hogy a két oldalon lévő vektorok egymással párhuzamosak maradhassanak, próbáljuk a megoldást  $\mathbf{c} := \ddot{\mathbf{x}}^{Des} - \mathbf{g}$ ,  $\mathbf{y}^N - \mathbf{x} = \alpha \mathbf{c}$  alakban keresni, ahol  $\alpha$  vagy pozitív vagy negatív szám lehet. Mindkét oldalt megszorozva a  $\mathbf{c}^T$  vektorral egy skalár egyenletet kapunk:

$$\begin{aligned} m_x \|\mathbf{c}\|^2 &= k\alpha \frac{\|\mathbf{c}\|^2}{|\alpha| \|\mathbf{c}\|} (|\alpha| \|\mathbf{c}\| - L_0) \Rightarrow \\ m_x &= k\alpha - \frac{kL_0}{\|\mathbf{c}\|} \frac{\alpha}{|\alpha|}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ha  $\alpha < 0$ , akkor  $\frac{\alpha}{|\alpha|} = -1$ , ha  $\alpha > 0$ , akkor  $\frac{\alpha}{|\alpha|} = 1$ . A megoldás e két különböző hipotézis szerint  $\alpha$  értékére

$$\begin{aligned} \alpha &= \left( m_x + \frac{kL_0}{\|\mathbf{c}\|} \right) \frac{1}{k} \text{ ha } \alpha > 0, \\ \alpha &= \left( m_x - \frac{kL_0}{\|\mathbf{c}\|} \right) \frac{1}{k} \text{ ha } \alpha < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

lehet. A megfelelő mennyiségek előjele (6)-ban ismert fizikai okok miatt, így az előjel vizsgálathoz az  $\left( m_x - \frac{kL_0}{\|\mathbf{c}\|} \right)$  mennyiség előjelét kell kiszámolni.

A fenti megfontolások segítségével létrehozott  $\mathbf{y}^N(t)$  „nominális pályához” (3)-hez hasonlóan egy gyorsabb,  $\lambda_y > \Lambda$  PID típusú relaxációt írhatunk elő (7)-ban,

$$\begin{aligned} \zeta_y(t) &:= \int_0^t (\mathbf{y}^N(\xi) - \mathbf{y}(\xi)) d\xi \\ \ddot{\mathbf{y}}^{Des} &= \ddot{\mathbf{y}}^N + \Lambda_y^3 \zeta + 3\Lambda_y^2 (\mathbf{y}^N(t) - \mathbf{y}(t)) + \\ &3\Lambda_y (\dot{\mathbf{y}}^N(t) - \dot{\mathbf{y}}(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

hiszen az (1) alapján  $\ddot{\mathbf{y}}$  értékét tudjuk közvetlenül befolyásolni az  $F$  erővel úgy, hogy  $\ddot{\mathbf{y}}^{Des}$  értéket egyszerűen behelyettesítjük az (1) csoport második egyenletébe. Természetesen ez a szabályozás is közelítő jellegű, mert megkonstruálása a  $\mathbf{H}$  viszkózus tag elhanyagolásán alapul. Ha ezen elhanyagoláson kívül még a modell-paraméterek is pontatlanok, adaptív szabályozásra van szükség.

#### 3.2. A pontatlan modellen alapuló adaptív szabályozás

Tegyük fel, hogy a valóságot a pontos  $m_x = 3 \text{ kg}$ ,  $m_y = 1 \text{ kg}$ ,  $b = 0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $k = 100 \text{ N/m}$ ,  $L_0 = 1 \text{ m}$  és  $\mathbf{g} = [0, 0, -9.81]^T \text{ m/s}^2$  paraméterek jellemzik, míg azok rendelkezésünkre álló közelítő értékei rendre  $\hat{m}_x = 2 \text{ kg}$ ,  $\hat{m}_y = 1.5 \text{ kg}$ ,  $\hat{b} = 0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $\hat{k} = 120 \text{ N/m}$ ,  $\hat{L}_0 = 1.2 \text{ m}$  és  $\hat{\mathbf{g}} = [0, 0, -10]^T \text{ m/s}^2$ . A  $\ddot{\mathbf{x}}^{Des}$  értéket most is (3) alapján számítjuk,  $\mathbf{y}^N(t)$  értékét pedig (4) azon változatából, amelybe a közelítő modell-paramétereket írjuk be. Erre a pályára előírjuk a (7) hibacsökkenést, amely a  $\ddot{\mathbf{y}}^{Des}$  kívánt második deriváltat eredményezi. Ezt az értéket a közelítő paraméterekkel ellátott (1) mozgásegyenletbe behelyettesítve megkapjuk a szükséges, becsült  $F$  erőt.

Megjegyezzük, hogy mivel  $\ddot{\mathbf{y}}^{Des}$  értéke  $\frac{d^2}{dt^2} \ddot{\mathbf{x}}^{Des}$  értékéből is adódik, a rendszerünk negyedrendű. Mivel a (6)-ból származó megoldás dupla deriválása zárt alakban, kézzel eléggé bonyodalmas, helyette a Kósi et al. [2013]-ban már publikált polinomiális deriváltot használhatjuk  $\ddot{\mathbf{y}}^N$  kiszámítására. A modell-pontatlanságok és egyéb elhanyagolások következményeit pl. a Tar [2009] közleményben már elemzett iteratív adaptív tanulással kísérreljük meg kompenzálni, melyben a szabályozás ciklusideje  $\delta t = 10^{-3} \text{ s}$ , és

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &:= \mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_n) - \ddot{\mathbf{x}}^{Des}, \quad \mathbf{e} := \mathbf{h}/\|\mathbf{h}\|, \\ \sigma(x) &:= \frac{x}{1 + |x|}, \\ \tilde{B} &= B_{ctrl} \sigma(A_{ctrl} \|\mathbf{h}\|) \\ \ddot{\mathbf{x}}_{n+1} &= \mathbf{G}(\ddot{\mathbf{x}}_n, \mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_n), \ddot{\mathbf{x}}_{n+1}^{Des}) := \\ &(1 + \tilde{B})\ddot{\mathbf{x}}_n + \tilde{B}K_{ctrl}\mathbf{e}, \end{aligned} \quad (8)$$

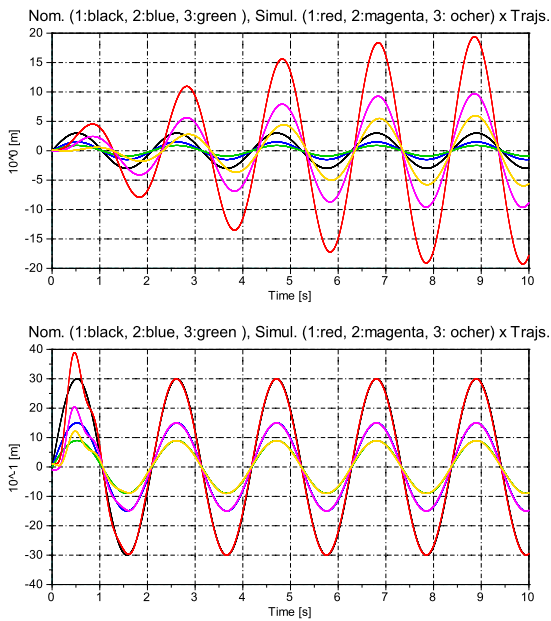
ahol az  $\mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_n) := \ddot{\mathbf{x}}(t_n)$  válaszfüggvény a megelőző szabályozó ciklusban kiadott jelre kapott megfigyelhető gyorsulás, az  $A_{ctrl}$ ,  $B_{ctrl}$ , és  $K_{ctrl}$  pedig az adaptív szabályozó paraméterei.

A (8) egyenletben szereplő  $\mathbf{G}(\ddot{\mathbf{x}}_n, \mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_n), \ddot{\mathbf{x}}_{n+1}^{Des})$  függvényről nyilvánvaló, hogyha létezik olyan  $\ddot{\mathbf{x}}_*$  szabályozó jel, amelyre  $\mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_*) = \ddot{\mathbf{x}}^{Des}$ , akkor  $\ddot{\mathbf{x}}_* = \mathbf{G}(\ddot{\mathbf{x}}_*, \mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_*), \ddot{\mathbf{x}}^{Des})$ , azaz a szabályozási feladat megoldása e függvény fixpontja, innen ered a fixpont transzformáció elnevezés. Ha e függvény  $\ddot{\mathbf{x}}_n$  szerint elég lapos, a vele készített iteráció e fixponthoz konvergál. E feltétel viszonylag könnyen teljesíthető a  $B_{ctrl} = \pm 1$ , a megfigyelhető gyorsulásoknál lényegesen nagyobb  $|K_{ctrl}|$  és egy elég kis pozitív  $A_{ctrl}$  paraméter beállításával. Szükség esetén ez utóbbi paraméter finoman hangolható a fixponthoz való konvergencia biztosításának érdekében. Az adott példában ilyen kiegészítő hangolásra

nem volt szükség. A következő szakaszban szimulációs eredményeket mutatunk be.

#### 4. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A szabályozási paraméterek a következők voltak:  $\Lambda = 6/s$ ,  $\Lambda_y = 12/s$ , az adaptív esetben ezekhez hozzájönnek a  $K_{ctrl} = -10^5$ ,  $B_{ctrl} = 1$ ,  $A_{ctrl} = 10^{-6}$  adaptív paraméter beállítások. A feladat egy térben ferde helyzetű ellipszoid pálya követése volt. A szimulációkban egyszerű Euler integrálást végeztünk, melynek időfelbontása megegyezett a  $\delta t = 10^{-3} s$  szabályozási ciklusidővel. Az 1. ábrán világosan látható, hogy az adaptivitás jelentős mértékben pontosította a pályakövetést.



1. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások pályakövetése az  $x$  koordinátára

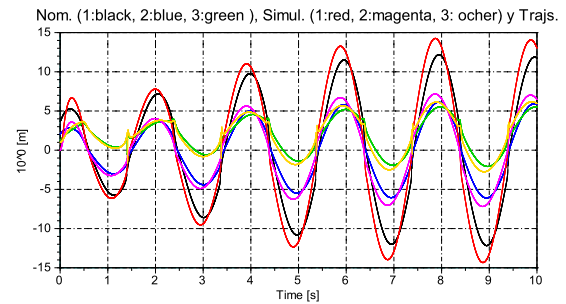
Az ábra alapján az gyanítható, hogy a nem adaptív szabályozás lassan divergál, az adaptív viszont szépen konvergál, ezt erősíti meg az  $y$ -ra vonatkozó 2. ábra is.

Az adaptivitás működését világítja meg az 3. ábra. A nem adaptív esetben a *vörös*, *bíbor* és *okker* színű vonalakat *egzaktul fedik* rendre a *barna*, *lila*, és *rózsaszín* vonalakat, míg az *adaptív* esetben ezek erősen szétválnak egymástól az adaptív deformációnak megfelelően, és a kívánt és szimulált értékek egymás közelébe kerülnek. Az adaptáció részleteit fedi fel az 4. ábra, részben az adaptáció bekapcsolásának környezetében, ahol szétválnak egymástól a nem adaptív szabályozás esetén összeeső vonalak.

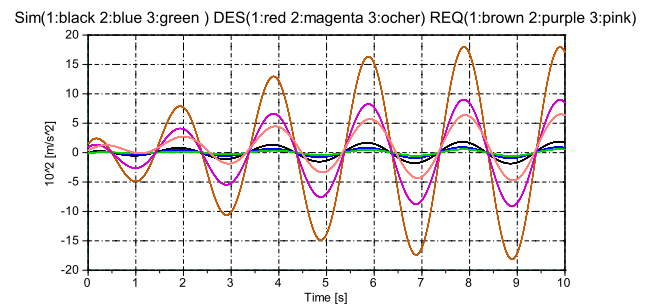
A kifejtett szabályozó erőket a 5. ábra mutatja. A nem adaptív esetben hektikus fluktuációk jelennek meg rendszeresen, míg az adaptív esetben ezek a durva kezdeti tranziensek lecsengése után eltűnnek. A kinagyított 6. ábra ezt részleteiben is könnyen láthatóvá teszi.

#### 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A rugalmas komponenseken keresztül hajtott jármű primitív modelljeként egy hat szabadsági fokú rendszer (két,



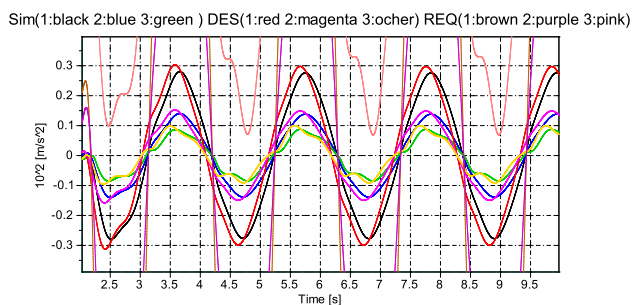
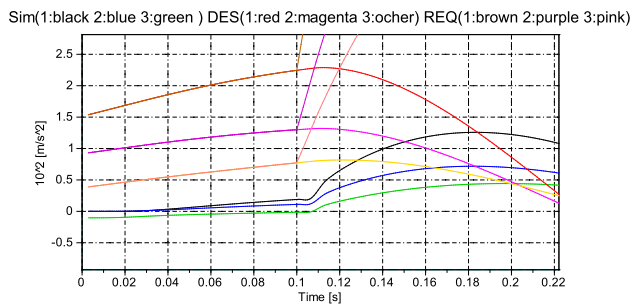
2. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások pályakövetése az  $y$  koordinátára



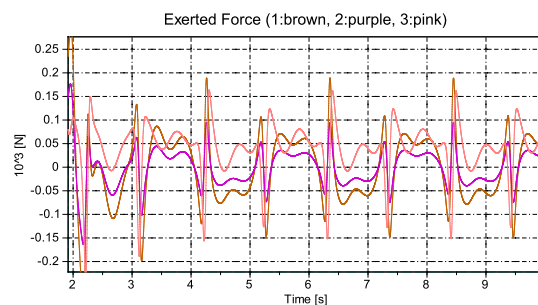
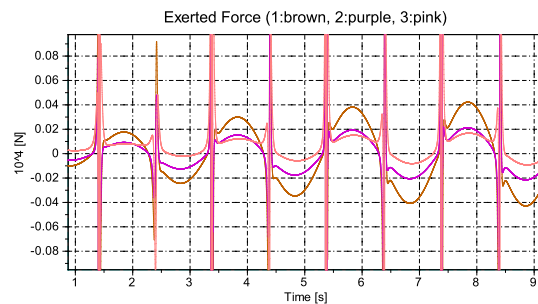
3. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások  $\ddot{x}$  koordinátáinak második idő szerinti deriváltjai: számított mozgás: fekete, kék, zöld vonalak; a „kívánt” („DES”) gyorsulás komponensek: piros, bíbor, okker; az adaptívan deformált „REQ” értékek: barna, lila, rózsaszín

egymáshoz rugalmas és disszipatív rugóval összekötött tömegpont) robusztus fixpont transzformáció segítségével való szabályozását vizsgáltuk jelentős mértékű paraméterpontatlanságok és elhanyagolások mellett. A tekintett probléma összességében egy negyedrendű szabályozási feladatnak is tekinthető.

A szimulációs eredmények alapján megállapítható, hogy az adaptivitás bevezetésével igen jelentős követési pontosság

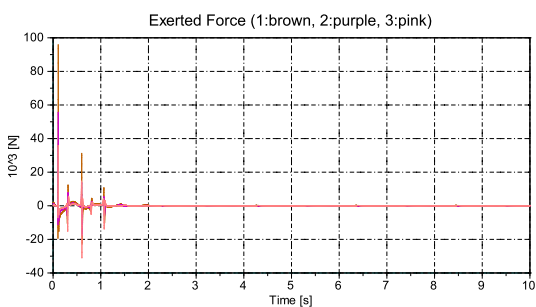
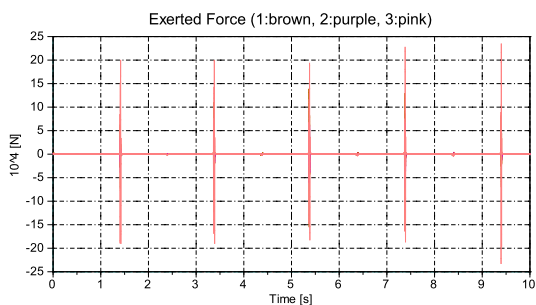


4. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások  $\ddot{x}$  koordinátáinak második idő szerinti deriváltjai: számított mozgás: fekete, kék, zöld vonalak; a „kívánt” („DES”) gyorsulás komponensek: piros, bíbor, okker; az adaptívan deformált „REQ” értékek: barna, lila, rózsaszín



6. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások esetén kifejtett erő-komponensek: barna, lila, rózsaszín (kinagyított részletek)

6plus1minus2



5. ábra. A *nem adaptív* (felső) és az *adaptív* (alsó) szabályozások esetén kifejtett erő-komponensek: barna, lila, rózsaszín

javulást sikerült elérni, egy instabil szabályozást sikerült stabilizálni egy geometriailag jól interpretálható, egyszerű módszerrel.

A továbbiakban célunk hasonló szabályozási módszer vizsgálata egy kocsi-testhez egyszerre több rugalmas elemmel rögzített merev teher precíz, sima, rázkódásmentes mozgásának megvalósítása érdekében.

#### Hivatkozások

R. Andoga, L. Madarász, T. Karol', L. Főző, and V. Gašpar. *Intelligent Supervisory System for Small Turbojet Engines - 2013*, In: *Topics in Intelligent Engineering and Informatics 2 : Aspects of Computational Intelligence: Theory and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

S. Banach. Sur les opérations dans les ensembles abstraits et leur application aux équations intégrales (About the Operations in the Abstract Sets and Their Application to Integral Equations). *Fund. Math.*, 3: 133–181, 1922.

C.P. Bernard and J.-J.E. Slotine. Adaptive control with multiresolution bases. *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, 10-12 Dec 1997, San Diego, CA*, 4: 3884–3889, 1997.

K. Hosseini-Suny, H. Momeni, and F. Janabi-Sharifi. Model reference adaptive control design for a teleoperation system with output prediction. *J Intell Robot Syst*, DOI 10.1007/s10846-010-9400-4: 1–21, 2010.

R. Isermann, K.H. Lachmann, and D. Matko. *Adaptive Control Systems*. Prentice-Hall, New York DC, USA, 1992.

R. Kamnik, D. Matko, and T. Bajd. Application of model reference adaptive control to industrial robot impedance control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 22: 153–163, 1998.

C.J. Khoh and K.K. Tan. Adaptive robust control for servo manipulators. *Neural Comput & Applic*, 12: 178–184, 2003.

U. Kösi, Á. Breier, and J.K. Tar. Chaos patterns in a 3 degree of freedom control with robust fixed point transformation. *13th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, Budapest, Hungary*, pages 1–5, 2012a.

- K. Kósi, Sz. Hajdu, J.F. Bitó, and J.K. Tar. Chaos formation and reduction in robust fixed point transformations based adaptive control. *4th IEEE International Conference on Nonlinear Science and Complexity (NSC 2012), Budapest, Hungary*, pages 211–216, 2012b.
- K. Kósi, T.A. Várkonyi, and J.K. Tar. On the simulation of rfpt-based adaptive control of systems of 4<sup>th</sup> order response. *Accepted for publication in the Proc. of the 2013 IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2013), 26-28 September 2013, Subotica, Serbia*, 2013.
- A.M. Lyapunov. *A general task about the stability of motion. (in Russian)*. PhD Thesis, University of Kazan, 1892.
- A.M. Lyapunov. *Stability of motion*. Academic Press, New-York and London, 1966.
- L. Madarász, R. Andoga, L. Főző, and T. Lázár. *Situational control, modeling and diagnostics of large scale systems*, In: I. Rudas, J. Fodor, J. Kacprzyk (eds.) *Towards Intelligent Engineering and Information Technology pp. 153-164*. Springer Verlag, Heidelberg, 2009.
- L. Madarász, R. Andoga, and L. Főző. Intelligent technologies in modelling and control of turbojet engines. *In: New Trends in Technologies: Control, Management, Computational Intelligence and Network Systems, 201, Rijeka*, pages 17–38, 2010.
- R.M. Murray, Z. Li, and S.S. Sastry. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, New York, 1994.
- C.C. Nguyen, S.S. Antrazi, Zhen-Lei Zhou, and C.E. Campbell Jr. Adaptive control of a stewart platform-based manipulator. *Journal of Robotic Systems*, 10 (5): 657–687, 1993.
- I. Sekaj and V. Veselý. Robust output feedback controller design: Genetic algorithm approach. *IMA J Math Control Info*, 22 (3): 257–265, 2005.
- Jean-Jacques E. Slotine and W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- J. Somló, B. Lantos, and P.T. Cát. *Advanced Robot Control*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
- J.K. Tar. Application of local deformations in adaptive control - a comparative survey (invited plenary lecture). *In: Proc. of the 7th IEEE International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2009), Palma de Mallorca, Spain, November 26-29, 2009*, pages 25–38, 2009.
- J.K. Tar. Towards replacing Lyapunov's 'direct' method in adaptive control of nonlinear systems (invited plenary lecture). *In: Proc. of the 2010 Mathematical Methods in Engineering International Symposium (MME 2010), October 21-24, 2010, Coimbra, Portugal*, 2010.
- J.K. Tar and K. Eredics. Simulation studies on various tuning methods for convergence stabilization in a novel approach of model reference adaptive control based on robust fixed point transformations. *Acta Technica Jaurinensis*, 4 (1): 37–57, 2010.
- J.K. Tar, J.F. Bitó, L. Nádai, and J.A. Tenreiro Machado. Robust Fixed Point Transformations in adaptive control using local basin of attraction. *Acta Polytechnica Hungarica*, 6 (1): 21–37, 2009.
- J.K. Tar, L. Nádai, I.J. Rudas, and T.A. Várkonyi. RFPT-based adaptive control stabilized by fuzzy parameter tuning. *9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011), Budapest, Hungary*, pages 1–8, 2011.
- J.K. Tar, I.J. Rudas, J.F. Bitó, and K. Kósi. Robust Fixed Point Transformations in the Model Reference Adaptive Control of a three DoF aeroelastic wing. *Applied Mechanics and Materials*, 300-3001: 1505–1512, 2013.
- J. Tick and J. Fodor. Fuzzy implications and inference processes. *COMPUTING AND INFORMATICS*, 24 (6): 591–602, 2005.
- Pi-Cheng Tung, Sun-Run Wang, and Fu-Yee Hong. Application of MRAC theory for adaptive control of a constrained robot manipulator. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 2083–2097, 2000.
- T.A. Várkonyi. Fuzzyfied robust fixed point transformations. *16th International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES 2012, Lisbon, Portugal, 13-15 June 2012*, pages 457–462, 2012.
- T.A. Várkonyi, J.K. Tar, I.J. Rudas, and I. Krómer. VS-type stabilization of mrac controllers using robust fixed point transformations. *7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania*, pages 389–394, 2012.
- T.A. Várkonyi, J.K. Tar, and I.J. Rudas. Improved neural network control of inverted pendulums. *Accepted for publication in „International Journal of Advanced Intelligence Paradigms” (IJAIP)*, 2013.