

Robusztus Fixpont Transzformációkra alapozott adaptív szabályozók konvergenciájának stabilizálása súlyozott átlagokkal

Tar József, Nádai László * Rudas Imre **
Várkonyi Teréz Anna (PhD hallgató) ***

* Óbudai Egyetem, Közlekedésinformatikai és Telematikai Egyetemi Tudásközpont, H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B, Magyarország (Tel: +36-1-666-5543; e-mail: {tar.jozsef@nik. nadai@juni-obuda.hu})

** Óbudai Egyetem, Intelligens Mérnöki Rendszerek Intézet, H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B, Magyarország (Tel: +36-1-666-5543; e-mail: rudas@uni-obuda.hu)

*** Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatikai Doktori Iskola, H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B, Magyarország (e-mail: varkonyi.teri@phd.uni-obuda.hu)

Tartalmi kivonat: Lyapunov komplikált II. vagy “direkt” módszerének egyszerű alternatívájaként *Robusztus Fixpont Transzformáció (RFPT)* alapuló adaptív szabályozást vizsgáltunk szimulációval két részlegesen és pontatlanul modellezett, egymással dinamikai csatolásban álló részrendszer mozgásának egymástól való függetlenítésére. A csatolt rendszerek mindegyike egy koci + kettős inga rendszer volt decentralizáltan, egymástól függetlenül működő szabályozóval, amelyek mindegyike a saját rendszerének csak egyetlen ingájáról “tudott”, továbbá nem volt tudomása a másik rendszerhez fűződő csatolásról sem. A modellezett szabadsági fokokra is csak egy nagyon primitív, skalár inerciamátrixú affin modellt alkalmaztak a szabályozók. E módszer “permanens és minden körülmények közt alkalmazható” modell helyett csak az adott szabályozási szituációban használható, gyorsan avuló temporális modellt használ, a mely a rendszer “jelenlegi” és “közelmúltbeli” viselkedésének megfigyelésén alapul, s így állandó karbantartást, frissítést igényel. A módszer eredeti változata e célból mindössze három adaptív paramétert használt, s konvergenciájának biztosításához e paraméterek nem igényeltek nagyon pontos beállítást. A konvergencia stabilizálása érdekében korábban egy viszonylag komplikált hangolási módszert javasoltunk e paraméterek egyikére. A jelen cikk e bonyolult hangolás egyszerű alternatíváját mutatja meg a csatolt rendszerek paradigmáját használva. Hangolás helyett a múltbeli megfigyelésekből a jövőre vonatkoztatott extrapolációt e paraméter több értékére kapott jóslások súlyozott átlagára számítja ki. A szimulációs eredmények tanúsága szerint ez az egyszerű eljárás jelentős mértékben javít a pályakövetés pontosságán is.

Kulcsszavak: Robusztus Fixpont Transzformációk, Adaptív Szabályozás, Cauchy Sorozatok, Súlyozott Átlagok.

1. BEVEZETÉS

A pontatlanul ismert, időben nem állandó paraméterű dinamikai rendszerek precíz adaptív szabályozása ma is kihívást jelent. A klasszikus modell-alapú eljárások vagy a megfelelő analitikus modell hiányával, vagy annak végtelen komplexitásával kerülhetnek szembe. Tipikus példa erre folyadékkal nem teljesen feltöltött tartály mozgása, miközben a lötyögő folyadék dinamikai kölcsönhatásban áll a tartály falával. Valós idejű szabályozás céljaira nyilvánvalóan semmiféle kontinuummechanikai modell értelmes felhasználása nem remélhető.

A rendelkezésre álló közelítő dinamikai modell adaptív finomhangolását megvalósító módszerek iskolapéldái az “*Adaptív Inverz Dinamikai Szabályozó (AID)*” és az “*Adap-*

tív Slotine-Li Robotszabályozó (ASLC) módszerek (Slotine et Li [1991]). Ezek megtervezése Lyapunov 2. “*direkt*” módszerén alapul, ami egy széles körben használható módszer nemautonóm dinamikai rendszerek szabályozásában. A tipikus stabilitás-bizonyítások Lyapunov PhD értekezésében közölt eredeti módszerét használják (Lyapunov [1892]), amely a múlt század közepén vált általánossá, s több kiadást is megért (pl. Lyapunov [1966]). Ennek nagy előnye, hogy nem igényli a mozgásegyenletek megoldását a stabilitás eldöntéséhez, hanem csak néhány egyszerű becslést. (E megoldások közismerten a legtöbb gyakorlati esetben “*zárt analitikus formában*” nem is fejezhető ki, csupán numerikus megoldási lehetőségek állnak rendelkezésünkre.) A becslés lényege, hogy a pályakövetési hibákból és a paraméterbecslés hi-

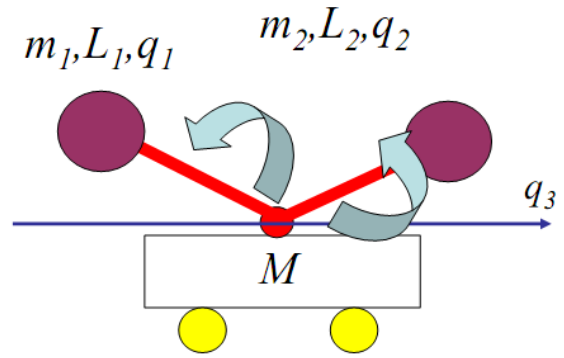
bájából készült kvadratikus struktúrájú, pozitív definit Lyapunov-függvény nem pozitív idő szerinti deriváltját kell garantálni a $t \in [0, \infty)$ tartományban.

E módszerek nagy előnye, hogy azok a fenti feltételek teljesülése mellett a szabályozás globális aszimptotikus stabilitását garantálják. Ugyanakkor az is világos, hogy ezek a feltételek gyakorlati szempontból túl erősen korlátozóak. A legtöbb komplex rendszernek vannak olyan csatolt részrendszerei, amelyeket nem tudunk kielégítően modellezni. A legközönségesebb súrlódási modellek nem elégítik ki a lineáris leválaszthatóság feltételét (e.g. Márton et Lantos [2006]), a dinamikus "LuGre" modell pedig csatolt belső részrendszert tartalmaz, bár ennek modellje legalábbis elvben ismert (Hensen et al. [2003]). Az erősen nemlineáris súrlódási effektusok főleg a kis sebességű mozgások szabályozásában nagyon zavaróak, paramétereinek valós idejű identifikálása nagyon nehéz és komplex feladat, nem megfelelő kompenzálásuk tartós követési hibát, túlkompenzálásuk határciklus jellegű oszcillációt eredményezhet (pl. Putra et al. [2007], Márton et Lantos [2009]).

Egy alkalmas, a szabályozandó rendszer modelljén alapuló "Lyapunov függvény jelölt" megtalálása, részletes kialakítása, továbbá a konvergenciát garantáló matematikai becslések, bizonyítások elvégzése nagy gyakorlatot, jó matematikai készségeket követel a tervezőtől, s általában nemtriviális kikötések, egyéb feltételek is szükségessé válnak, miközben a bizonyítások egy átlagos méretű cikk több oldalát is kitölthetik. Az előzetesen szükséges dinamikai modell identifikálása is bonyolult feladat. A robotok főbb paramétereinek identifikálása (beleértve néhány súrlódási modell paramétereit is) lehet egy járható út, amit egy esettanulmány is alátámaszt (Vuong et Ang [2009]). Bizonyos esetekben "Globálisan Linearizált Szabályozó" tervezése esetén Wavelet Hálózatok kombinálása a fuzzy technikával szintén hatékony lehet (pl. Kratmüller [2010]), bár a Lyapunov technika ilyen szabályozók tervezésében is szóba jöhet. Fuzzy szabályozók használata (pl. Gayakwad [2010]) vagy az ún. Gray Box Identifikációs Technika (Toorani et Farahmandzad [2010]) használata (gyakorta a frekvencia-tartományban) szintén lehetséges lehet, noha a fuzzy szabályozó paramétereinek optimális beállítása nem egyszerű feladat.

A Lyapunov technikához kötődő nehézségek megkerülésére egyéb alternatív megközelítések is ki lettek munkálva. Egy régebbi megközelítés (Tar et al. [2004]) egy "jól skalázható soft computing" kialakítására tett kísérletet, elvetve a "konvencionális soft computing" folytonos függvényekre kidolgozott, Kolmogorov approximációs tétele alapján (Kolmogorov [1957]) működő univerzális közelítéseket megvalósító struktúrák használatát. Ehelyett egyszerű Lie csoportokból vett univerzális struktúrákat "sima" függvényekre. E célból egy nagyon primitív, közelítő kiindulási affin rendszermodellt használt, amelyet a jelen cikkben is alkalmazunk.

A lokális vonzási tartománnyal rendelkező RFPT alapú módszerek további alternatív lehetőségnek bizonyultak a "sima" függvényekkel jellemezhető rendszerek adaptív szabályozásának kialakítása szempontjából (pl. Tar et al. [2008], Tar et al. [2009]). Az így tervezett szabályozók a "Komplett Stabilitás" fogalmát alkalmazták, ami a cel-



1. ábra: a kocsi+kettős inga rendszer vázlata

lularis neurális hálózatok használatát a szempontjából is egy alapfogalom (Roska [2001]). Ez a módszer az "elvárt-megvalósult válaszón alapuló adaptív szabályozás" névvel is jellemezhető, s később kiderült róla, hogy "Referencia Modell Alapú Szabályozó (MRAC)" kiépítésére is használható (Tar et al. [2010a], Tar [2010b]). E módszer bizonyos mértékig rokonítható a "Situációs Szabályozó"-val (pl. Andoga et al. [2007]), de itt nem áll módunkban tipikus szituációk hierarchikus kiépítése. Az RFPT szabályozók eredeti változata három fix értékű adaptív paraméterrel dolgozott. A konvergencia stabilitásának biztosítása érdekében később javaslatot tettünk az adaptív paraméterek egyikének hangolására, míg a jelen közleményben ennek egy jóval egyszerűbb alternatíváját mutatjuk be az egyik paraméter különböző értékeire kapott predikcióinak súlyozott átlagolásával.

A cikkben először a kocsi+kettős inga rendszer mint alkalmazási paradigma dinamikai modelljét mutatjuk be, majd a szabályozási módszer lényegét ismertetjük. Ezt követően szimulációs eredményeket mutatunk be és diszkutálunk. A közleményt a következtetések levonása zárja.

2. A KOCSI + KETTŐS INGA RENDSZER DINAMIKAI MODELLJE

A tekintett nemlineáris dinamikai rendszer vázlata az 1. ábrán látható. A rendszernek két forgási szabadsági foka, q_1 és q_2 van, melyek közül a lokális szabályozó csak q_1 létéről tud, annak állapotát tudja mérni és hajtással befolyásolni, valamint a lineáris q_3 szabadsági fok menti mozgás állapotát is tudja mérni és befolyásolni. Nem tud továbbá az adott kocsi szabályozója arról, hogy a vízszintes tengely mentén egy nemlineáris rugóval hozzá van csatolva egy hasonló kocsi+kettős inga rendszerhez.

A mozgásegyenletek az alábbiak:

$$\begin{bmatrix} m_1 L_1^2 & 0 & -m_1 L_1 s q_1 \\ 0 & m_2 L_2^2 & -m_2 L_2 s q_2 \\ -m_1 L_1 s q_1 & -m_2 L_2 s q_2 & M + m_1 + m_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 L_1 g c q_1 \\ m_2 L_2 g c q_2 \\ -m_1 L_1 c q_1 \dot{q}_1^2 - m_2 L_2 c q_2 \dot{q}_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

a következő jelölésekkel: $c q_i = \cos q_i$, $s q_i = \sin q_i$, g a gravitációs gyorsulás állandója, és a $Q_2 \equiv 0$ feltétel jelenti azt,

hogy a rendszer nem teljesen hajtott: a 2. tengely tetszése szerint szabadon foroghat. A pontos modell-paraméterek a következő értékek voltak: $M^A = 4 \text{ kg}$, $M^B = 4 \text{ kg}$. Az ingák elhanyagolható inerciájú, $L_1^A = 2$, $L_2^A = 2 \text{ m}$, $L_1^B = 1.5$, $L_2^B = 1.5 \text{ m}$ hosszúságú rudakra szerelt, $m_1^A = 10$, $m_2^A = 10$, $m_1^B = 8$ és $m_2^B = 7 \text{ kg}$ tömegű, kis kiterjedésű golyókból álltak. A gravitációs gyorsulás értékét $g = 10 \text{ m/s}^2$ -nek vettük.

A komplikált (1) modell helyett mindkét kocsit szabályozója a szimpla $[Q_1, Q_3]^T = 10[\tilde{q}_1, \tilde{q}_3]^T + [10, 10]^T$ affin modellt használta amelyet korábban is már alkalmaztunk (Tar et al. [2004]). A saját hajtásai által kifejtett erőn túl a két kocsit összekötő rugóerők Q_{3c}^A és $Q_{3c}^B \equiv -Q_{3c}^A$ külső perturbációként jelentkeztek a szabályozók számára:

$$Q_{3c}^A := k(q_3^B - q_3^A - L_0) + \frac{A_{coupl}}{(\varepsilon_{bump} + q_3^B - q_3^A - 1.5L_0)^2} - \frac{A_{coupl}}{(\varepsilon_{bump} + q_3^B - q_3^A - 0.5L_0)^2} \quad (2)$$

$k = 2 \times 10^4 \text{ N/m}$ rugóállandóval és további csatolási adatokkal mint $A_{coupl} = 1000 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $\varepsilon_{bump} = 10^{-3} \text{ m}$, $L_0 = 3.5 \text{ m}$. A következő rész az adaptív szabályozási módszer lényegét ismerteti.

3. AZ ELVÁRT-MEGVALÓSULT VÁLASZON ALAPULÓ ADAPTÍV SZABÁLYOZÁS

E módszer egy alapötletből áll, melyhez különböző "segéd-megoldások" is társíthatók.

3.1 Az alapötlet egyváltozós rendszerekre

Számos szabályozási feladat megfogalmazható úgy, hogy a szabályozandó rendszer valamilyen pontatlan és részleges modellje (φ) alapján a rendszer egy "kívánt válaszból" (r^d) kiszámítunk valamilyen $Q = \varphi(r^d)$ "gerjesztést", melyre a rendszer (akár modellhibák, akár külső zavarok, akár mindkét körülmény szimultán fennállása miatt) valamilyen "megvalósult választ" $r^r \equiv \psi(\varphi(r^d)) \equiv f(r^d) \neq r^d$ produkál, ahol ψ jelöli a tényleges rendszer-dinamikát. A legegyszerűbb szabályozási mód vagy a φ modell módosítása, vagy az ennél is egyszerűbb eljárás, az r^d bemeneti válasz deformálása r_\star^d értékre lenne úgy, hogy fennálljon az $r^d = f(r_\star^d)$ összefüggés. Egy ilyen helyzet fent-tartható lehet lokális deformációk bevezetésével, amelyek a rendszer állapotát valamilyen trajektória mentén mintegy maguk után húzzák. Egy ilyen lokális deformációt javasoltunk egy "bemenetű-egy kimenetű" (SISO - Single Input - Single Output) rendszerekre (Tar et al. [2008]), amely viszonylag robusztus volt a szabályozott rendszerre érvényes $f()$ függvény speciális sajátosságaira nézve. E robusztusság matematikailag az $f(x)$ függvény x_\star körüli affin közelítésével értelmezhető mint a $\tanh(x)$ függvény erős nemlineáris telítődéséből eredő tulajdonság az alábbi módon:

$$G(x|x^d) := (x + K) \times [1 + B \tanh(A[f(x) - x^d])] - K \quad (3)$$

$$G(x_\star|x^d) = x_\star \quad \text{ha} \quad f(x_\star) = x^d, \quad G(-K|x^d) = -K, \quad (4)$$

$$G(x|x^d)' = \frac{(x + K)ABf'(x)}{\cosh(A[f(x) - x^d])^2} + 1 + B \tanh(A[f(x) - x^d]), \quad (5)$$

$$G(x_\star|x^d)' = (x_\star + K)ABf'(x_\star) + 1.$$

Világos, hogy az (3)-ben definiált leképezésnek van egy "megfelelő" (x_\star) és egy "hamis" ($-K$) fixpontja, s hogy az A , B , és K szabályozási paraméterek alkalmas manipulálásával számos fizikai rendszer esetében elérhető lehet, hogy az $\{x_0, x_1 = G(x_0), \dots, x_{n+1} = G(x_n), \dots\}$ egyszerű iterációval nyert sorozat x_\star -hoz konvergáljon egy körülötte kialakított vonzási medencén belül. Ennek érdekében elegendő a $|G'| \leq H < 1$ [$0 \leq H < 1$] feltétel biztosítása x_\star -ban és környezetében (5) szerint, ami "kontraktív leképezésként" az ($x_n \rightarrow x_\star$) konvergenciára vezethet:

$$\begin{aligned} |G(x_\star) - x_\star| &\leq |G(x_\star) - x_n| + |x_n - x_\star| = \\ &= |G(x_\star) - G(x_{n-1})| + |x_n - x_\star| \leq \\ &\leq H|x_\star - x_{n-1}| + |x_n - x_\star| \rightarrow 0, x_n \rightarrow x_\star. \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 Az alapötlet kiterjesztése többváltozós rendszerekre

A (3)-ben adott módszer egy lehetséges kiterjesztése "több bemenetű-több kimenetű" [Multiple Input-Multiple Output (MIMO)] rendszerekre a következőképp történhet. Egy egyváltozós szigmoid függvény segítségével, amely 0 bemenetnél 0 kimenetet ad [erre a (3)-ben adott \tanh függvényen kívül számtalan lehetőség van, például a $\sigma(x) := x/(1 + |x|)$ függvény], leképezést végzünk a "válaszhiba" irányában az n . szabályozási ciklusban: legyen a vektor jellegű válaszhiba $h := f(r_n) - r^d$, $e := h/\|h\|$, $\tilde{B} = B\sigma(A\|h\|)$, s a leképezés kimenete legyen $r_{n+1} = (1 + \tilde{B})r_n + \tilde{B}Ke$. A K , B , és A paraméterek meghatározására egy adott alkalmazás céljaira szimulációs számítások végezhetőek durván megbecsült paraméterhibákra egy egyszerű PID szabályozóval az előforduló válaszok maximumára nézve $\|f\|$. Ekkor beállítható a $K \approx -10$ vagy $-1000 \times \|f\|_{max}$, $B = \pm 1$ (a $\frac{\partial f}{\partial r}$ gradiens jellegétől függően), és A elég kicsivé tehető ahhoz, hogy fennálljon a következő becslés: $|KA| \cdot \|\frac{\partial f}{\partial r}\| \approx 0.5$. A szabályozás konvergenciájának fenntartása érdekében a mozgásnak belül kell maradnia az iteráció vonzási tartományában. Ezt korábban az egyetlen A paraméter hangolásával biztosítottuk, ha K és B már be voltak állítva.

3.3 A szükséges transzformáció mértékének fokozatos mérséklése lineáris interpolációval

Mivel a Tar et al. [2004] közleményben használt megoldás perturbációs számításra alapult, konvergenciára csak közel egységtranszformációk szorzata esetén számítottunk. Ennek feltételei a gépi tanulás elején, midőn csak nagyon durva modell áll rendelkezésre, nem teljesülnek. E hátrányt kiküszöbölendő vezettük be a ξ paramétert, amely a szükséges deformáció mértékét jellemezte, az v "alakfaktor" paramétert, amely két kis pozitív ε_1 és ε_2 paraméterrel együtt meghatározta azt a "regulációs faktort", amely lineáris interpolációval mérsékli a túl nagy szükséges deformációt az alábbi képlet szerint:

$$\xi := \frac{|f - r^d|}{\max(|f|, |r^d|)}, \quad \lambda = 1 + \varepsilon_1 + \frac{(\varepsilon_2 - 1 - \varepsilon_1) v \xi}{1 + v \xi} \quad (7)$$

$$\hat{r}^d := f + \lambda(r^d - f).$$

Ez az interpoláció a szabályozás kritikus fázisaiban is az egységoperátor környezetében tartotta a szükséges transzformációt és biztosította a konvergenciát. E „*regulációs faktort*” megtartottuk az RFPT transzformációs alább elemzett változatában is az $v = 0.5$, $\varepsilon_1 = 0.2$, és $\varepsilon_2 = 10^{-5}$ paraméter-beállítások mellett.

3.4 A közvetlen és a régebbi előzmények figyelembe vétele az avuló információ polinomiális súlyozásával

Általában egy modell-független lineáris szűrő vagy egy integrál, vagy diszkrét idejű változatban egy szumma formájában modellezhető mint

$$\tilde{f}(t) := \int_0^\infty F(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad \text{or} \quad \tilde{f}_k := \sum_{i=0}^\infty F_i f_{k-i} \quad (8)$$

valamilyen monoton csökkenő, pozitív értékű $F(\tau) > 0$ vagy $F_k > 0$ függvény formájában, amely nullához tart, midőn $\tau, k \rightarrow \infty$. Egy diszkrét szabályozó esetében a legkevesebb műveletet és memóriát az $F_k := \beta^k (1 - \beta)$ ($0 < \beta < 1$) megoldás jelenti egy P puffert bevezetésével, melynek tartalma a $P_{n+1} = \beta P_n + f_{k+1}$ szabály szerint frissül, és a *szűrt érték* a $\tilde{f}_{k+1} = (1 - \beta) P_{k+1}$ mennyiség. A β paraméter aktuális értéke a *rendszer memóriájának hosszát befolyásolja*: kis érték esetén gyorsan felejt, egyhez közeli érték esetében lassabban. A továbbiakban ezt a segédmodszert is használtuk a szimulációs vizsgálatokban.

3.5 Az A szabályozó paraméter súlyozott átlagainak bevezetése

A korábbi szimulációs vizsgálatok sokaságának tanulságai szerint az (3) egyenlet A paraméterének nagyon pontos beállítása a konvergencia tényét kevésbé befolyásolta, annak gyorsaságát viszont jelentős mértékben. Egy adott K és B paraméter mellett több konkrét A érték is megfelelt. Ez adta az ötletet arra, hogy a (3) egyenletet ne egy konkrét A értékre számoljuk ki, hanem alkalmazzuk több lehetséges A értékhez tartozó eredmény súlyozott átlagát, azaz legyen az $n + 1$. szabályozási ciklusban a deformált érték

$$x(n+1) = \sum_i w_i x_i(n+1)$$

$$x_i(n+1) := (x_n + K) [1 + B \tanh(A_i |f(x_n) - x_{n+1}^d)|] - K, \quad (9)$$

ahol a $w_i > 0$ súlyokra valamilyen ésszerű választás tehető: lehetnek egyenletesek, vagy valamilyen elv szerint választva változóak. Mivel valós időben szabályozunk, nem lehet az egyes választások hatását külön-külön kipróbálni, és a legjobb értéket kiválasztani. Az alkalmazott eredmény mindig egy átlaghoz tartozik. Az itt javasolt eljárás a

$$w_i(n+1) = \frac{1}{\|x_i(n) - x_{n+1}^d\| + 10^{-3}} \quad (10)$$

súlyozást használta, amelyik a finomabb, kisebb mértékű módosításhoz tartozó A_i értékhez rendel nagyobb súlyt, mint a nagyobb értékűekhez.

4. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

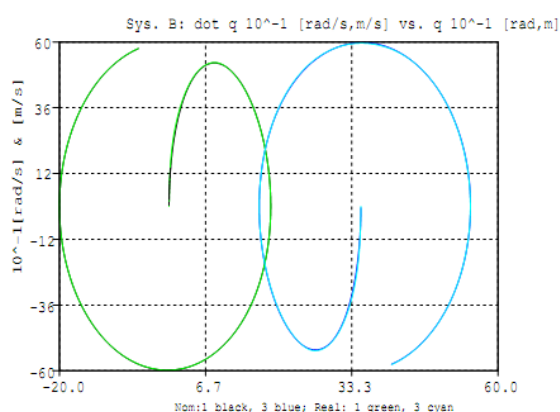
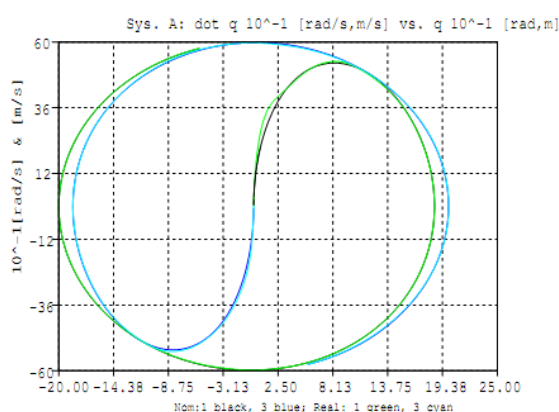
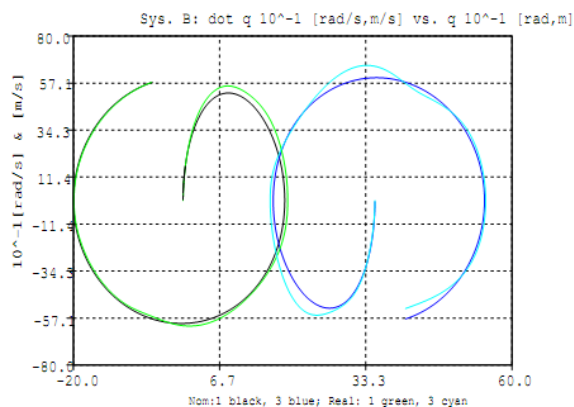
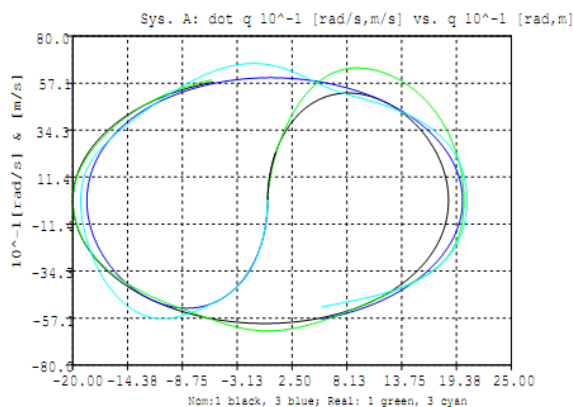
Szimulációs vizsgálatok céljára a *SCILAB 5.1.1* verziószámú szoftvercsomagot használtuk, amely kutatási célokra szabadon használható. Közönséges Euler-integrációt használtunk 0.1 ms időfelbontással, míg a digitális szabályozó ciklusideje $\Delta t_{\text{Cycle}} = 1 \text{ ms}$ volt. A mérési zajok modellezésénél azzal a feltevéssel éltünk, hogy a PID típusú, kinematikailag meghatározott

$$r^d(t) := \ddot{x}^{\text{Des}}(t) = \ddot{x}^{\text{Nom}}(t) + D [\dot{x}^{\text{Nom}}(t) - \dot{x}(t)] + P [x^{\text{Nom}}(t) - x(t)] + I \int_0^t [x^{\text{Nom}}(\tau) - x(\tau)] d\tau \quad (11)$$

visszacsatolásban a koordináta-mérés és a csuklósebesség mérése külön közvetlen szenzorokkal, korlátos tartományban egyenletesen elosztott zajjal a q_1 és q_3 koordinátákra a $[-0.02, +0.02] \text{ rad}$ ill. m , valamint a \dot{q}_1, \dot{q}_3 koordinátákra a $[-0.06, +0.06] \text{ rad/s}$ ill. m/s értékekkel történik. Feltettük továbbá, hogy a \ddot{q}_1, \ddot{q}_3 értékeket a zajos \dot{q}_1, \dot{q}_3 értékekből numerikus deriválással számolja a szabályozó Δt_{Cycle} diszkrét időfelbontással. A PID paraméterek úgy voltak beállítva, hogy három, egymáshoz közeli valós (azaz oszcillációtól mentes) időállandóval [$\alpha_1 = 20/s$, $\alpha_2 = 0.9\alpha_1$, és $\alpha_3 = 0.8\alpha_1$] lecsengő követési hibát eredményezzenek. Adaptív szabályozás esetén a $K = 8 \times 10^4$, $B = 1$ és $\{A_i := 10^{-6+0.1i}, i = 0, 1, \dots, 9\}$ értékeket használtuk. A felejtő paraméter értéke $\beta = 0.2$ volt. Külön végeztünk vizsgálatokat zajmentesnek illetve zajosnak feltételezett mérésekre.

A zajmentes eset fázisrajektóriáit ábrázoló 2. és 3. ábra jól szemlélteti az adaptív szabályozó eredményességét. Hasonló trend figyelhető meg a pályakövetési hibákra a 4. és 5. ábrákon is.

Az 6. ábra világosan mutatja az adaptív szabályozó működését. A q_1 koordinátára vonatkozó, kinematikailag megfogalmazott PID korrekciókat tartalmazó „*kívánt (desired)*” értékek *fekete* vonala hamar fedésbe kerül a „*megvalósuló (realized)*” mozgás *piros* vonalával, s jelentősen különbözik az adaptív deformáció eredményeképp a rossz rendszermodellre kiadott „*torzított (required)*” értékeket megjelenítő *zöld* vonaltól. Hasonlóan, a q_3 koordinátára kiszámolt „*kívánt (desired)*” értékek *kék* vonala a „*megvalósuló (realized)*” mozgás adatait reprezentáló *sárga* vonallal kerül fedésbe és erősen különbözik a „*torzított (required)*” értékeket reprezentáló *ciánkék* vonaltól. Az aktív szabályozás hajtóerőit mutató 7. ábra szerint a hajtóerőkben nincs nagyfrekvenciás ingadozás. Az 8. ábra tanúsága szerint a (7) egyenlet λ „*regulációs faktora*” főleg a kezdeti tranziensek sima kezelésében játszik jelentős szerepet. A 9. és 10. ábrák szerint a különböző A_i paraméterekhez tartozó súlyok egymáshoz közel állnak, ám a mozgás különböző szakaszain különböző értékek kaphatnak nagyobb súlyt. Fontos, hogy maguk az A_i paraméterek jelentős tartományt fednek le definícióik szerint.



2. ábra: az A részrendszer fázisrajtória nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajmentes esetben

3. ábra: a B részrendszer fázisrajtória nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajmentes esetben

Annak bizonyítására, hogy a különböző A_i értékek súlyozása stabilizálta a konvergenciát, a fenti futással azonos, zajmentes feltételek mellett számításokat végeztünk egyetlen A értékre, a $\{A_i := 10^{-6+0.1i}, i = 0, 1, \dots, 9\}$ sorozat A_0 kezdő tagjára. A 11. és 12. ábra tanúsága szerint ezzel a egy paraméterrel a szabályozó nem lett volna konvergens.

A zajok mellett adaptív és nem adaptív szabályozók fázispálya-követése a 13. és 14. ábrán, a pályakövetési hiba a 15. és 16. ábrákon látható. A 17. ábra az adaptáció részleteit mutatja. Világos, hogy a második deriváltakra alapozott adaptivitás nem eredménytelen mérési zajok esetében sem.

A 18. ábra értelmében az adaptivitásnak köszönhetően elkerülhető az extrém nagy PID paraméterek használata, így a zajok nem eredményeznek extrém nagy ingadozást a hajtónyomatékokban sem. A 19. ábra szerint az ingadozások mérséklésében a *regulációs faktor* is jelentős szerepet játszik.

5. A KAPOTT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

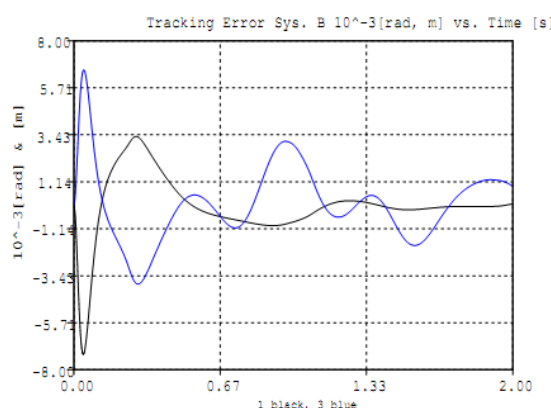
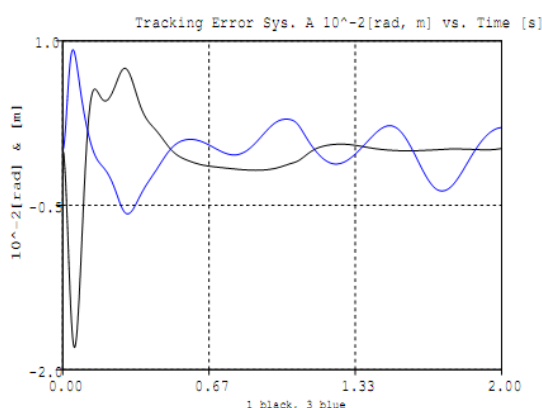
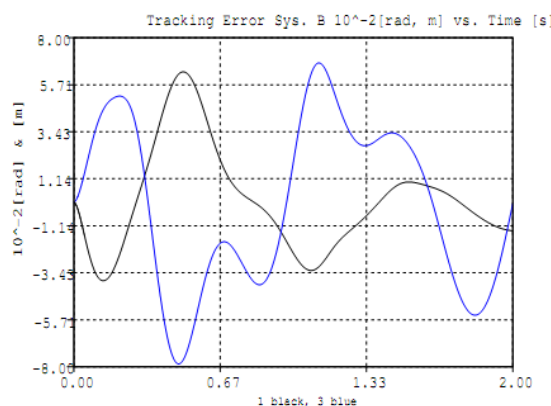
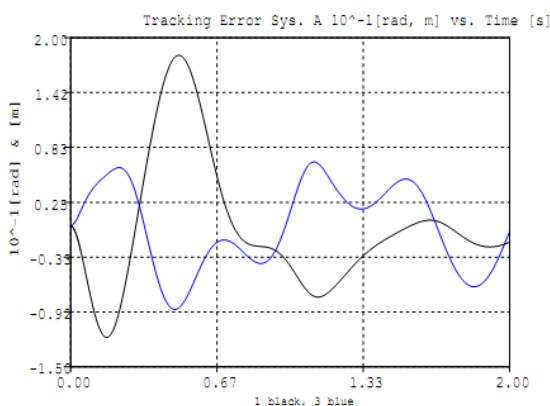
Egy részlegesen és nagyon pontatlanul modellezett paradigma (két csatolt kocsis és dupla inga rendszer) segítségével szimulációs eredményekkel mutattuk be, hogy a „Robosztus Fixpont Transzformációkon” alapuló adaptív szabályozó stabilitása növelhető, ha a mindössze három

adaptív szabályozó paraméter egyikének értékét nem egyértelműen határozzuk meg, hanem egy tágabb készletből válogatva súlyozott átlaggal számoljuk ki a szükséges adaptív deformációt. Az alkalmazott súlyok annál nagyobbak, minél finomabb deformáció tartozik az adott paraméter értékhez. Ez az eljárás eredményesen használja a korábban is már használt „*regulációs faktor*” technikát, melynek lényege az adott pillanatban alkalmazott deformációk mértékének mérséklése. Kimutattuk, hogy a használt készletnek csupán egyetlen értékével dolgozó szabályozó divergens lett volna. Az alkalmazott módszer kiegyensúlyozottan használja fel a legfrissebb és a már kissé avult mérési eredményeket, megfigyeléseket. Kimutattuk továbbá, hogy az alkalmazott adaptív technika jelentős mértékben robusztus a szükséges visszacsatolások meghatározásakor jelentkező mérési zajokra.

A további kutatásokat illetően megjegyezhető, hogy a Dombi [2009] közlemény további lehetőségeket kínál kombinált paraméter értékek használatára.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a *Nemzeti Fejlesztési Ügynökség* és az *OTKA* (OTKA CNK 78168) támogatásával jött létre.

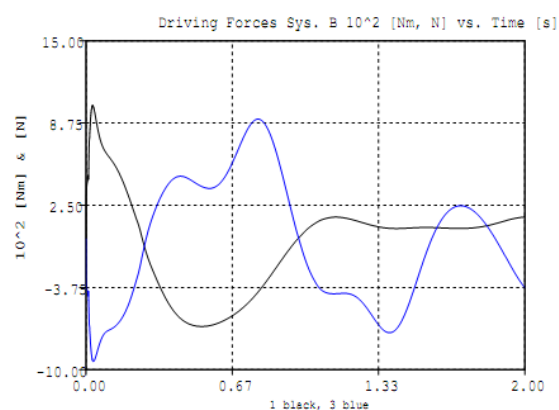
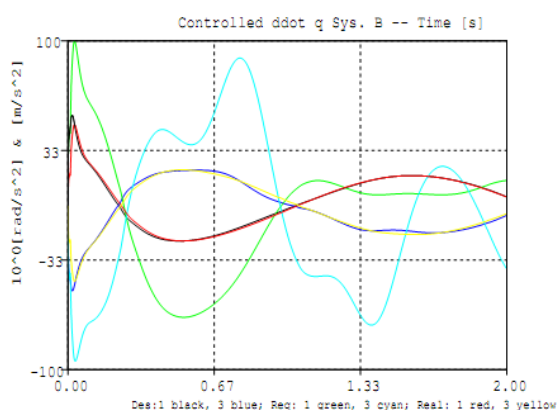
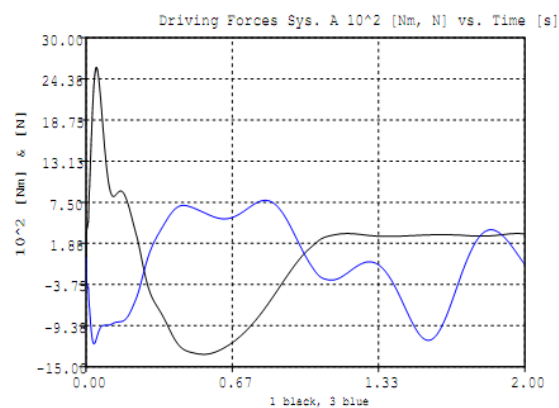
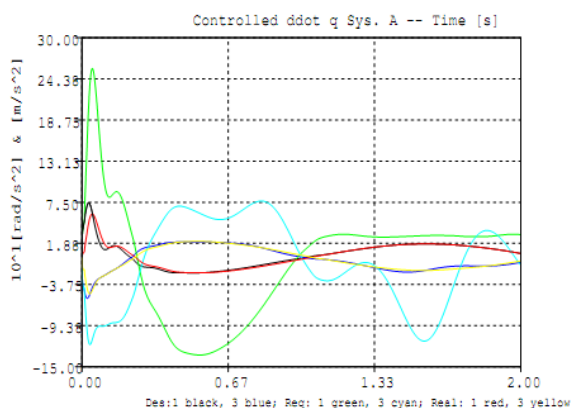


4. ábra: az A részrendszer pályakövetési hibája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajmentes esetben

5. ábra: a B részrendszer pályakövetési hibája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajmentes esetben

REFERENCIÁK

- R. Andoga, L. Főző & L. Madarász. Digital Electronic Control of a Small Turbojet Engine MPM 20. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 4, No. 4, pp. 83–95, 2007.
- J. Dombi. Pliant Arithmetics and Pliant Arithmetic Operations. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 6, No. 5, pp. 19–49, 2009.
- R. Gayakwad. Optimized Fuzzy Logic for Motion Control. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 7, No. 5, pp. 161–168, 2010.
- H.A. Hensen, M.J.G. van de Molengraft and M. Steinbuch. Friction induced hunting limit cycles: A comparison between the LuGre and switch friction modell. *Automatica*, pp. 2131–2137, vol. 39, 2003.
- A.N. Kolmogorov. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superpositions of Continuous Functions of One Variable and Addition. *Doklady Akademii Nauk USSR* (in Russian), 114:953–956, 1957.
- M. Kratmüller. Combining Fuzzy/Wavelet Adaptive Error Tracking Control Design. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 7, No. 4, pp. 115–137, 2010.
- A.M. Lyapunov. A general task about the stability of motion (in Russian). *PhD Thesis*, 1892.
- A.M. Lyapunov. Stability of motion. *Academic Press, New-York and London*, 1966.
- L. Márton, B. Lantos. Identification and Model-based Compensation of Striebeck Friction. *Acta Polytechnica Hungarica*, pp. 45–58, Vol. 3, No. 3, 2006.
- L. Márton, B. Lantos. Friction and backlash induced limit cycles in mechanical control systems. *Proc. of European Control Conference 2009, 23–26 August 2009, Budapest, Hungary*, pp. 3875–3880, 2009.
- D. Putra, H. Nijmeijer and N. van deWouw. Analysis of undercompensation and overcompensation of friction in 1DOF mechanical systems. *Automatica*, vol. 43, pp. 1387–1394, 2007.
- T. Roska. Development of Kilo Real-time Frame Rate TeraOPS Computational Capacity Topographic Microprocessors. Plenary Lecture at the *10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001)*, Budapest, Hungary, August 22–25, 2001.
- Jean-Jacques E. Slotine, W. Li. Applied Nonlinear Control. *Prentice Hall International, Inc.*, Englewood Cliffs, New Jersey 1991.
- J.K. Tar, I.J. Rudas, J.F. Bitó. Comparison of the Operation of the Centralized and the Decentralized Variants of a Soft Computing Based Adaptive Control. *Proc. of the Budapest Tech Polytechnical Institution's Jubilee Conference 1879-2004*, September 4, 2004, Budapest, Hungary, pp. 331–342, 2004.
- J.K. Tar, J.F. Bitó, I.J. Rudas, K.R. Kozłowski, and J.A. Tenreiro Machado. Possible adaptive control by tangent



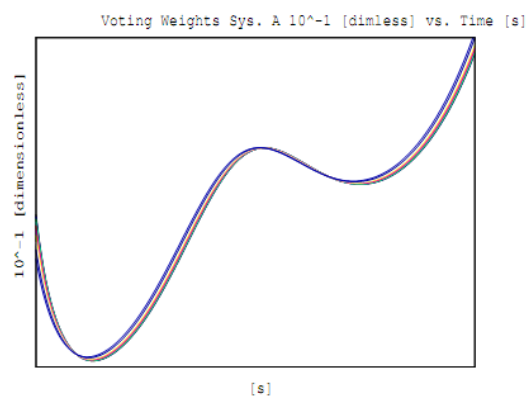
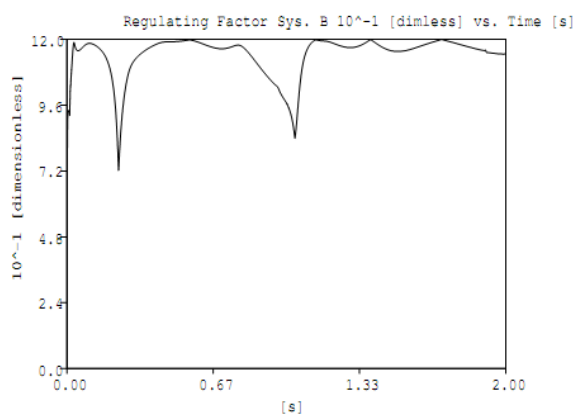
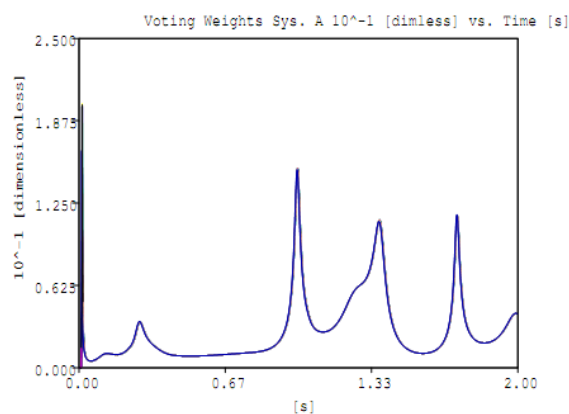
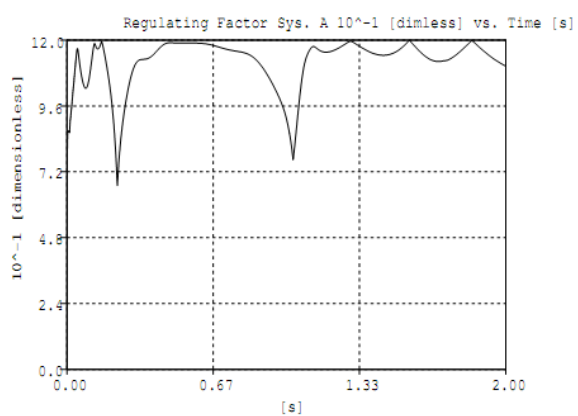
6. ábra: az A és B részrendszer "kívánt", "deformált (req)" és szimulált szabályozott koordinátáinak második idő szerinti deriváltja az adaptív szabályozás mellett, zajmentes esetben

7. ábra: az A és B részrendszer hajtónyomatéka (Q_1) és lineáris hajtóereje (Q_3) az adaptív szabályozás mellett, zajmentes esetben

hyperbolic fixed point transformations used for controlling the Φ^6 -type Van der Pol oscillator. *Proc. of the 6th IEEE International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2008), November 27–29, 2008, Stará Lesná, Slovakia*, pp. 15–20, 2008.

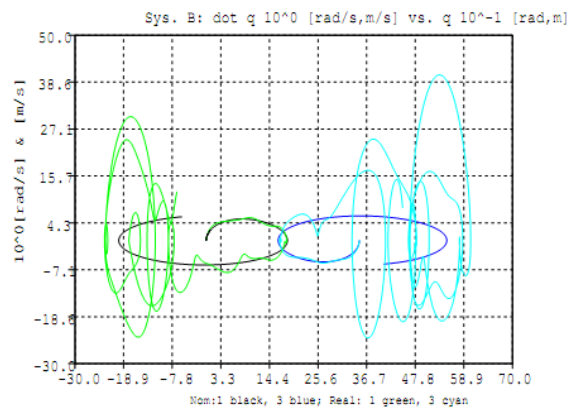
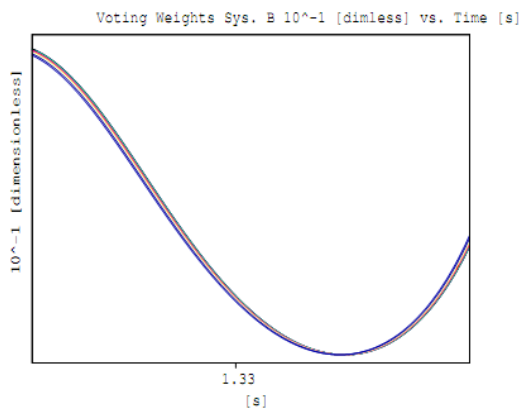
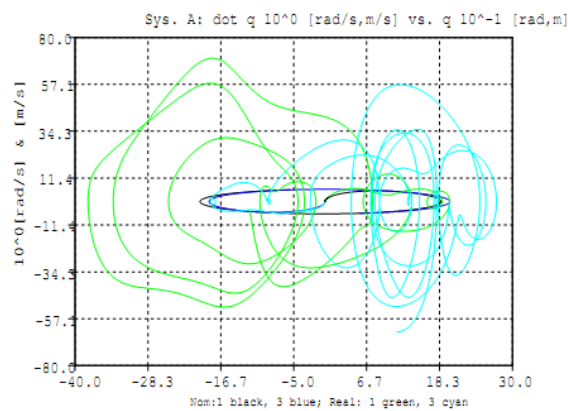
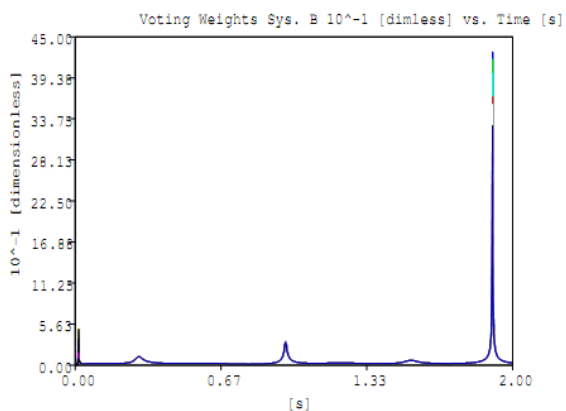
- J.K. Tar, J.F. Bitó, L. Nádai, J.A. Tenreiro Machado. Robust Fixed Point Transformations in Adaptive Control Using Local Basin of Attraction. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 6 Issue No. 1, pp. 21–37, 2009.
- J.K. Tar. Replacement of Lyapunov Function by Locally Convergent Robust Fixed Point Transformations in Model based Control, A Brief Summary. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 14:(2) pp. 224–236, 2010a.
- J.K. Tar. Towards Replacing Lyapunov's "Direct" Method in Adaptive Control of Nonlinear Systems. (invited plenary lecture), *Proc. of the 3rd Conference in Mathematical Methods in Engineering*, 21–24 October 2010, Coimbra, Portugal, Paper 11 (CD issue) 2010b.
- J.K. Tar, J.F. Bitó, I.J. Rudas. Replacement of Lyapunov's Direct Method in Model Reference Adaptive Control with Robust Fixed Point Transformations. *Proc. of the 14th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2010*, Las Palmas of Gran Canaria, Spain, May 5-7, pp. 231–235, 2010a.

- J.K. Tar, I.J. Rudas, J.F. Bitó, K.R. Kozłowski and C. Pozna. A Novel Approach to the Model Reference Adaptive Control of MIMO Systems. *Proc. of the IEEE 2010 Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2010) Conference, June 23-25 2010, Budapest, Hungary*, pp. 31–36, 2010b.
- J.A. Tenreiro Machado. Fractional Calculus and Dynamical Systems, invited plenary lecture at the *IEEE International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2006)*, Tallinn, Estonia, August 20-22, 2006.
- F. Toorani, H. Farahmandzad. Gray-Box Modeling of a Pneumatic Servo-Valve. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 7, No. 5, pp. 129–142, 2010.
- N.D. Vuong, M.H. Ang Jr. Dynamic Model Identification for Industrial Robots. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 6, No. 5, pp. 51–68, 2009.



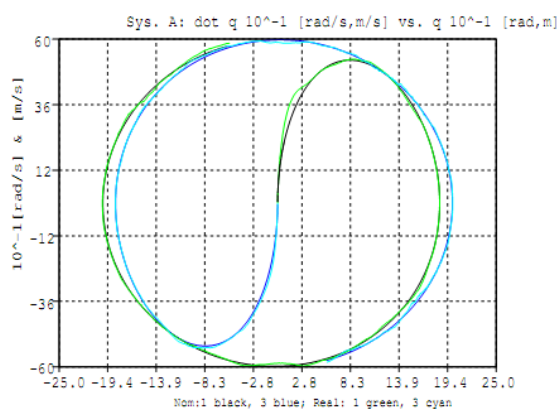
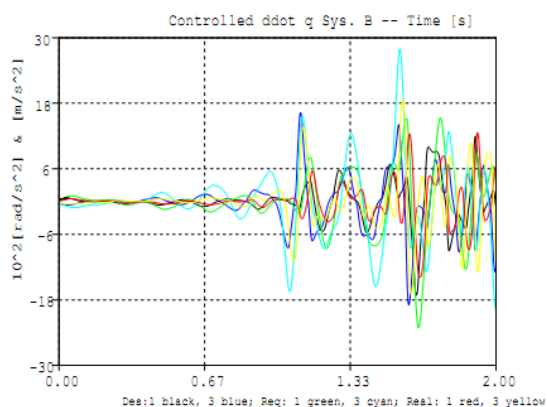
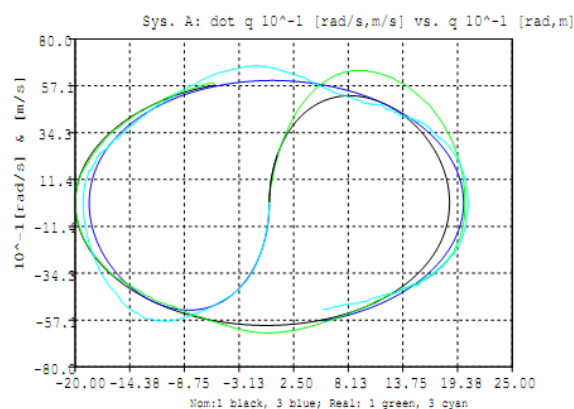
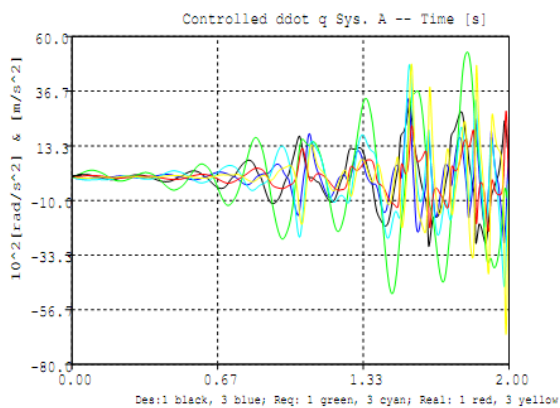
8. ábra: az A és B részrendszer regulációs faktora az adaptív szabályozás mellett, zajmentes esetben

9. ábra: az A részrendszer A_1 paraméterhez tartozó normalizálatlan súlyai az adaptív szabályozás mellett (nagyított részlet az alsó grafikonon), zajmentes esetben



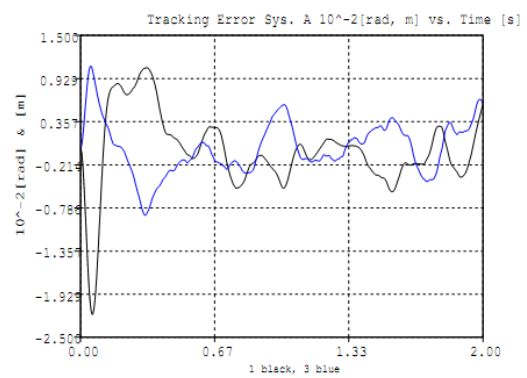
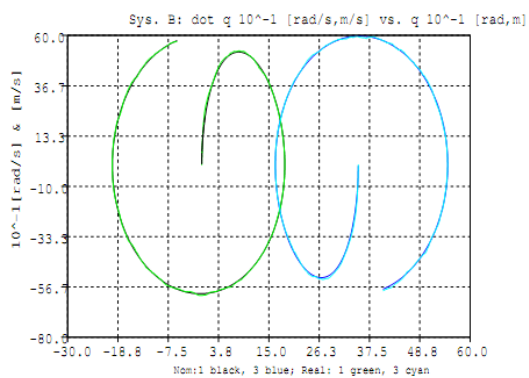
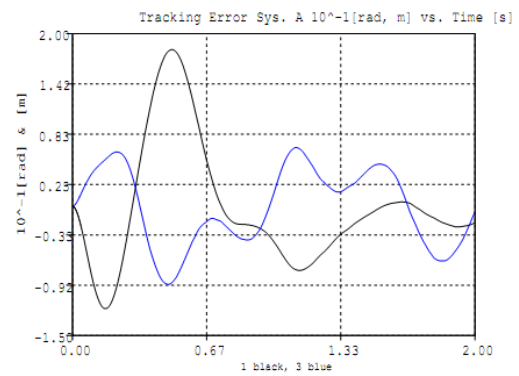
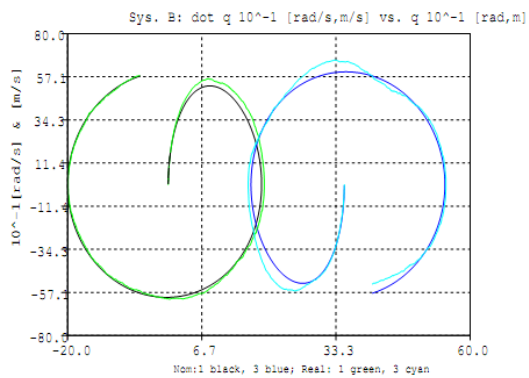
10. ábra: a B részrendszer A_i paraméterhez tartozó normalizálatlan súlyai az adaptív szabályozás mellett (nagyított részlet az alsó grafikonon), zajmentes esetben

11. ábra: az A és B részrendszer fázisrajtóriája egyetlen, $A = A_0 = 10^{-6}$ paraméterrel működő adaptív szabályozás mellett, zajmentes esetben



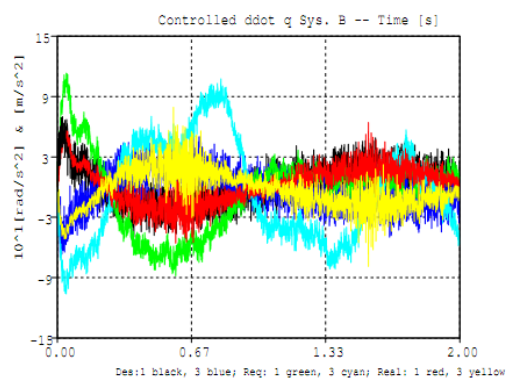
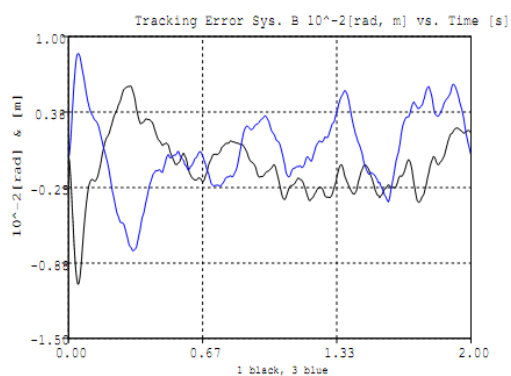
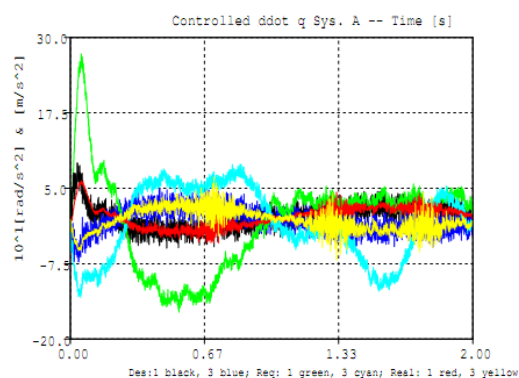
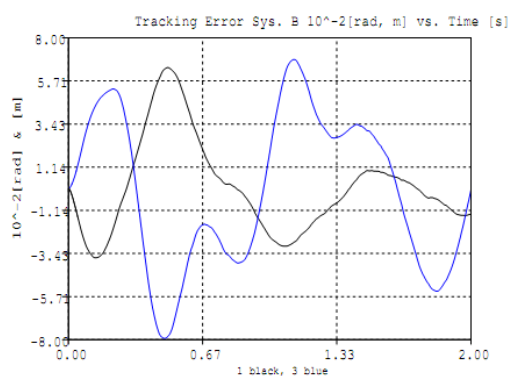
12. ábra: az A és B részrendszer „kívánt”, „deformált (req)” és szimulált szabályozott koordinátáinak második idő szerinti deriváltja egyetlen, $A = A_0 = 10^{-6}$ paraméterrel működő adaptív szabályozás mellett, zajmentes esetben

13. ábra: az A részrendszer fázisrajktóriája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajos esetben



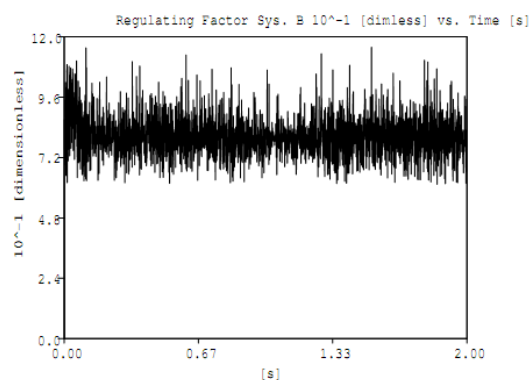
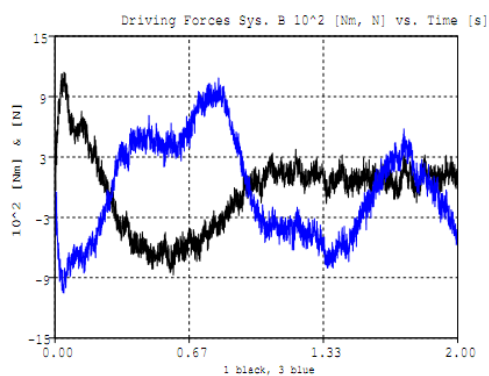
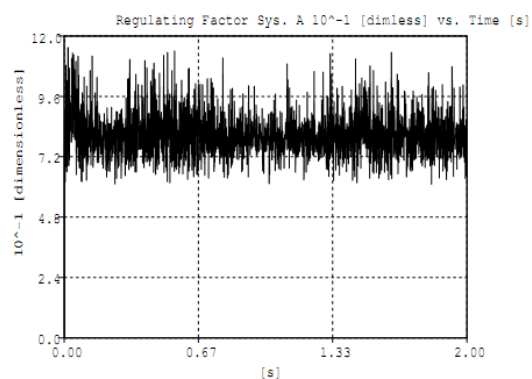
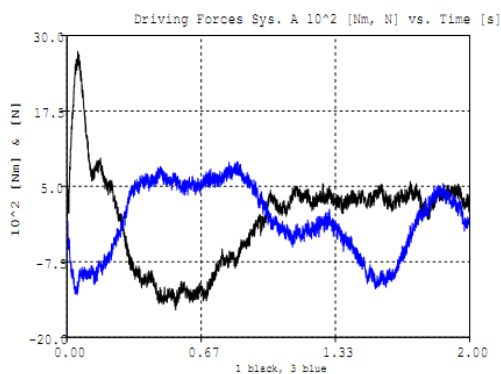
14. ábra: a B részrendszer fázisrajtóriája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajos esetben

15. ábra: az A részrendszer pályakövetési hibája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajos esetben



16. ábra: a B részrendszer pályakövetési hibája nem adaptív (felső ábra) és adaptív (alsó ábra) szabályozás mellett, zajos esetben

17. ábra: az A és B részrendszer "kívánt", "deformált(req)" és szimulált szabályozott koordinátáinak második idő szerinti deriváltja az adaptív szabályozás mellett, zajos esetben



18. ábra: az A és B részrendszer hajtónyomatéka (Q_1) és lineáris hajtóereje (Q_3) az adaptív szabályozás mellett, zajos esetben

19. ábra: az A és B részrendszer regulációs faktora az adaptív szabályozás mellett, zajos esetben