

Ismeretlen külső zavarok adaptív kompenzálása omnidirekcionális kerékkal hajtott robotkocsi mozgásszabályozásában[★]

Tar József* Nádain László** Lőrincz Katalin***
Ráti Csaba (student)****

* *Budapesti Műszaki Főiskola, Közlekedésinformatikai és Telematikai
Egyetemi Tudásközpont, H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B,
Magyarország (Tel: +36-1-666-5543; e-mail: tar.jozsef@nik.bmf.hu).*

** *MTA SzTAKI, H-1111 Budapest, Kende u. 13-17, Magyarország
(Tel: +36-1-279-6278 ; e-mail: nadai@sztaki.hu)*

*** *Budapesti Műszaki Főiskola, Bánki Donát Gépész és
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, H-1081 Budapest, Népszínház utca 8,
Magyarország (Tel: +36-1-666-5410; e-mail:
lorincz.katalin@bkgk.bmf.hu)*

**** *Budapesti Műszaki Főiskola, Neumann János Informatikai Kar,
H-1034 Budapest, Bécs út 96/B, Magyarország*

Tartalmi kivonat: A speciális, három omnidirekcionális keréssel hajtott automatikus járművek [Automatic Guided Vehicles (AGVs)] ipari alkalmazásokban lehetnek kiváltképp hasznosak, mivel az ún. "Ackerman-típusú" kormányzási rendszerű járművektől eltérően pontos helyük és orientációs helyzetük működésük síkjához viszonyítva egymástól függetlenül pontosan beállítható. A jelenlegi konstrukciókban általában minden egyes kerék tetszőleges irányban gördülhet az érintkezés síkjához képest, erőt azonban csak egy irányban tud kifejteni, az arra merőleges irányban viszont szabadon elgördül. Korábbi munkánkban ilyen járművek vízszintes síkon való mozgásának adaptív szabályozását vizsgáltuk. A jelen vizsgálatok ezek eredményeit terjesztik ki ismeretlen dőlésszögű, ferde síkú pályán való mozgásra úgy, hogy a háromszög alakú robotkocsi egyik csücskéhez rugóval rögzített, a mozgás síkjában viszkózus súrlódással csillapított mozgású, számára szintén ismeretlen nehezéket vonszol, ami fizikai értelemben dinamikailag csatolt, nem ismert és nem modellezett részrendszernek felel meg. Numerikus szimulációkkal mutatjuk meg, hogy a javasolt robusztus fixpont transzformációs szabályozás ebben az esetben is hatékonyan működik. A módszernek olyan esetekben lehet nagy gyakorlati értéke, amelyekben a csatolt részrendszer dinamikáját nagyon nehéz vagy praktikusán lehetetlen precízen modellezni, pl. amikor a kocsi egy részben feltöltött tartályban lötyögő folyadékot szállít.

1. BEVEZETÉS

Praktikus okokból széles körű kutatások folynak akadályoktól zsúfolt környezetben navigáló mobilrobotok különböző szempontokból optimális pályájának kialakítására. A ma hagyományosnak mondható megközelítések (pl. a "BUG" –rovarok falkövető mozgását utánozó algoritmus– és annak újabb változatai mint a "TBA" –*Tangent Bug Algorithm*– Lozano-Perez [1983], az "SFP" –*Shortest Feasible Path*– algoritmus Moutalier et al. [1996]) és a "Láthatósági Gráf Algoritmus" – pl. Simsarian et al. [1996]) közös jellegzetessége, hogy azok a pályagörbéket az akadályok közvetlen közelében tervezik. Az azokkal való ütközések elkerülése érdekében, amik a robot korlátozott pontosságú lokalizációs készségei miatt fordul-

* Munkánk az NKTH támogatásával a "Pázmány Péter Program" keretében folytatott RET-10/2006 sz. "2. Forgalmi rendszerek modellezése" c. projektje "2.3. Járműviselkedés automatikus analízise" alprojektjének részét képezte. A támogatást ezúton is hálással köszönjük. Köszönetünket fejezzük ki továbbá a CNK 78168 sz. OTKA projekt keretében kapott támogatásért is.

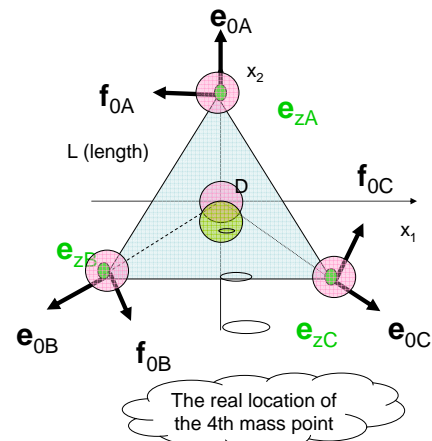
hatnak elő, ezek a módszerek általában egy "biztonsági zóna" bevezetésével mintegy megnagyítják az akadályokat. Ennek a durva közelítésnek következtében előfordulhat, hogy voltaképp a robot által bejárható útvonalak záródnak ki a pályatervezés folyamán. A navigálás hatékonyságának növelése érdekében különböző marker-technikák alkalmazhatók, amelyek az akadályok méretnövelését nem egy durva felülbecslés, hanem csupán a lokálisan szükséges mérték erejéig végzik (pl. Nagy et Bencsik [2003], Nagy [2005]). Jól bejárható, azaz szögletektől vagy nagyon éles kanyaroktól mentes trajektóriák tervezése érdekében szplájn-függvények bevezetése is alkalmazható (pl. Reif [2000]). Az így "kisimított" pályagörbék esetében nem kell a robotnak megállnia a szögleteknél, vagy nagyon erősen lassítania az éles kanyaroknál, hogy az dinamikai okokból ki ne sodródjék a pályájáról. A "legjobb utak" megtervezéséhez különböző gráfsúlyozási technikák használhatók, (pl. Tan et Mamady [2006]) vagy annak nem régi finomítása (Nagy et Vajta [2001]). Az utóbbiban a gráfok élein kívül azok csúcspontjai is beszámíthatnak a szükséges kanyarodás szögétől függő mértékben. Ez a súlyozási tech-

nika már figyelembe kell vegye az adott konkrét robot és munkadarab rendszer dinamikai modelljét, valamint annak szabályozási módszerét is, amik együtt alakítják ki a ténylegesen megvalósuló mozgást a maga borulási ill. kisodródási kockázatával együtt.

A BMF-ben a KITT vezetésével készített diplomamunkájában *Gergely István* egy vízszintes síkon mozgó, három omnidirekcionális keréssel hajtott robotkocsi konkrét, de pontatlan dinamikai modelljén és a szintén a BMF-ben kialakított fixpont transzformációs módszeren alapuló adaptív szabályozását vizsgálta numerikus szimulációval (Gergely [2009]). Kimutatta, hogy a javasolt adaptív módszer alkalmas lehet e feladattal való megbirkózásra, továbbá vizsgálta a rendszer hajtásának teljesítményfelvételét éles kanyarokat is tartalmazó pályagörbék befutása közben, s kimutatta, hogy a hagyományos hajtású omnidirekcionális kerekek esetében, midőn egy kerék csak egy irányban képes tolóerőt kifejteni, míg az arra merőleges irányban csupán szabadon elfordul, jelentős mértékű, mivel a kanyarokban legalább az egyik kerék kénytelen a többi "ellenére" dolgozni, hogy a kanyarodás forgatónyomaték igényei megvalósuljanak. (Ilyenkor a kocsi alváza szenved el belső kontakt erőket.) Javasolt egy durva kinematikai vázlatot a kis kerekek hajtásának koordinált megvalósítására, s kimutatta, hogy ezek használatával a hajtásrendszer teljesítmény-igényei jelentős mértékben redukálhatók lennének. Vizsgálataiban fel volt tételezve, hogy a pálya síkja a gravitációs gyorsulásra pontosan merőleges (azaz a robotkocsinak nem kell domboldalt megmásznia a gravitáció ellenében, ill. legurulás ellen fékezést alkalmaznia), továbbá azt, hogy a tekintett klasszikus mechanikai rendszer valamennyi szabadsági foka, noha meglehetősen pontatlanul, de legalább modellezett.

Az általa tekintett problémánál lényegesen nagyobb komplexitású feladat, midőn a modell szerint alkalmazott feltételezéssel szemben a robot mozgásának síkja meg van döntve a gravitáció szerint "függőlegesnek" definiálható irányhoz képest, valamint ha az nem modellezett, a modellezett részrendszerekkel dinamikai csatolásban álló részrendszerekkel is bír. Jelen közleményünkben ez utóbbi esetet modellezzük úgy, hogy a háromszög alakú robotkocsi egyik csücskéhez rugóval rögzített, a mozgás síkjában viszkózus súrlódással csillapított mozgású nehezéket vonszol, miközben ugyanazt az egyszerű fixponttranszformációs szabályozási technikát alkalmazzuk, mint korábban is. Kimutatjuk, hogy az általunk javasolt egyszerű adaptív szabályozási módszer jelentősen képes javítani a megvalósuló mozgás minőségét. Módszerünknek különösen akkor lehet jelentős gyakorlati értéke, ha a csatolt részrendszer dinamikai modellezése nagyon bonyolult, esetleg valós időben praktikus lehetetlen. Ilyen esetnek felel meg a kocsi által tartályban szállított folyadék, amely a kocsi vázától függetlenül ható önálló belső szabadsági fokokkal bír, de a tartály falával érintkezve a kocsival dinamikai kölcsönhatásban áll, és drasztikusan befolyásolja annak mozgását.

A közlemény felépítése a következő: a 2. szakasz ismerteti a kocsi szabályozás által feltételezett és a szimulációban használt pontos dinamikai modelljét, valamint azt az egyszerű, tisztán kinematikailag megfogalmazott PID jelgű szabályozást, amellyel a pályakövetést kívántuk előírni; a 3. szakasz az adaptív szabályozás alapgondo-



Ábra 1. A kocsi modelljének sematikus leírása

latát ismerteti, majd a numerikus számítási eredményeket közöljük a 4. szakaszban. A közleményt az eredmények értékelése zárja a 5. szakaszban.

2. A KOCSI DINAMIKAI MODELLJE

Mint az közismert, a hagyományos Ackerman-típusú kormányrendszerű járműveket lényeges kinematikai korlátok jellemzik: geometriai felépítésükből adódóan nem írható elő egyszerre pontosan helyük és orientációjuk. Számukra megfelelő pályatervezési technikákat lehet alkalmazni (pl. Murray et Sastry [1993], Tar et al. [2008b]). Velük szemben az omnidirekcionális kerekekkel hajtott járművek esetében mind a pontos hely, mindpedig a pontos forgáshelyzet (orientáció) előírható a mozgáspálya síkján. Ezért paradigmának a Holland [1983] által adotthoz hasonló háromszög alakú alvázzal rendelkező rendszert választottuk, melyet sematikusán az 1. ábra mutat be.

Feltételeztük, hogy a jármű alváza $L = 2m$ oldalhosszúságú szabályos háromszög. Az aktív hajtóerők irányát ortogonális egységvektorok jelölik a megfelelő (A, B és C jelű) kerekeknél ($\mathbf{e}_A, \mathbf{f}_A, \mathbf{e}_B, \mathbf{f}_B$ és $\mathbf{e}_C, \mathbf{f}_C$) az (x, y) síkon, ahol az \mathbf{e} vektorok iránya a háromszög geometriai középpontját a megfelelő csücskkel összekötő vektor irányának felel meg. A kocsi síkon való elfordulásával \mathbf{e} vektorok is mereven forognak a síkra merőleges q_3 tengely körül. Mindhárom kerékre közös a síkra merőleges, z irányú egységvektor, \mathbf{e}_z , amelynek irányában a síkra merőleges kontakt erők hatnak a kerekekre. A kocsi akkor nem borul fel biztonsággal, ha ezek az erők a z_+ irányba mutatnak, mivel a talaj közvetlenül csak taszító erőt képes kifejteni a kocsira, vonzóerőt nem. Feltettük továbbá, hogy a csücsök fölött közvetlenül egy-egy nehezékek+hajtás rendszer helyezkedik el, darabonként $M = 30 \text{ kg}$ tömeggel. A kocsi geometriai középpontja fölött $h_D = 0.5 \text{ m}$ magasságban $2 \times M \text{ kg}$ további pontszerű teher létét tételeztük fel. A kocsi síkon való mozgását a feltételezett tömegközéppont síkbeli nominális koordinátáival ($\mathbf{S}^{(m)N} m$) és az \mathbf{e} pont körüli elfordulás előírt, nominális szögével ($q_3^N \text{ rad}$) kívántuk megadni, az idő függvényében. Felhasználva a Klasszikus Mechanika törvényeit, mi szerint inerciális vonatkoztatási rendszerhez képest mérve a merev test tömegközéppontjának gyorsulása szorozva a test teljes tömegével az arra ható külső erők összegével egyenlő, valamint hogy a test pil-

lanatnyi tömegközéppontjára vonatkoztatott impulzusnyomatékának idő szerinti deriváltja a testre ható összes külső erő e pontra vonatkoztatott forgatónyomatékával egyenlő, a nominális mozgásból valamint a kinematikailag előírt pályakövetési szabályból adódó gyorsulások és a dinamikai modell, valamint a hatóerőkre felírt optimalizálási követelmények együttesen meghatározzák az egyes kerekeknek alkalmazandó aktív hajtóerőket a megfelelő sík irányokban (F_{Ae_A} , F_{Af_A} , F_{Be_B} , F_{Bf_B} , és F_{Ce_C} , F_{Cf_C}), továbbá a z irányú lokális kontakt erőkomponenseket (F_{A_z} , F_{B_z} , és F_{C_z}) is. (Az 1. ábra szerint nem hajtott kis kerekek esetében az \mathbf{e} irányú komponensek zérusok, és az aktív erők meghatározása egyértelmű, míg hajtott kis kerekek esetében a feladat megoldása nem egyértelmű, ami megfelel tetszőleges, azonos hatásvonalú, ellentétes irányú erők hozzáadásának a feladat egy lehetséges megoldásához, mivel ezeknek eredője éppúgy mint eredő forgatónyomatéka zérus, csak a rendszeren belül ható kontakt erőkre és az egyes hajtások teljesítményfelvételére vagy fékezésére vannak hatással. A nem egyértelmű feladat megoldását Gergely [2009] az összes fellépő ortogonális erőkomponens négyzetösszegének minimalizálásával tette egyértelművé, ami technikailag csupán egy Moore–Pennrose típusú pszeudinverz meghatározását jelentette.) A megfelelő “kívánt gyorsulások”, azaz a $\ddot{\mathbf{S}}^{(m)D}$ és \ddot{q}_3^D komponensek előírása szimpla PID jellegű kinematikai pályakövetési törvény szerint történt, azaz elvártuk, hogy legyen érvényes valamennyi előírt $\ddot{\xi}^D = \dot{\xi}^N + P_\alpha(\xi^N - \xi) + D_\alpha(\dot{\xi}^N - \dot{\xi}) + I_\alpha \int_{t_0}^t [\xi(\tau)^N - \xi(\tau)] d\tau$ komponensre, ahol $\alpha = \{q_3, xy\}$, és $P_{q_3} = P$, $D_{q_3} = D$, $I_{q_3} = I$, $P_{xy} = 4P$, $D_{xy} = 4D$, $I_{xy} = 4I$, és a számításokban a $P = 50 \text{ s}^{-2}$, $D = 10 \text{ s}^{-1}$, és $I = 5 \text{ s}^{-3}$ paraméter-beállítást alkalmaztuk.

$$\begin{bmatrix} 5M^{(m)}(\ddot{\mathbf{S}}^{(m)} + \mathbf{g}^{(m)}) \\ \dot{\mathbf{P}}^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{(m)} & \mathbf{B}^{(m)} & \mathbf{C}^{(m)} \\ \mathbf{D}^{(m)} & \mathbf{E}^{(m)} & \mathbf{F}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_e \\ \mathbf{F}_f \\ \mathbf{F}_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ahol $\mathbf{P}^{(m)}$ jelöli a modell impulzusmomentum vektort, $\mathbf{g}^{(m)}$ a gravitációs gyorsulás vektora (erről feltettük, hogy csak a 3. komponense nem zérus), a nagy modell-mátrix 3×3 -as méretű blokkjai pedig a következőképp vannak definiálva: $\mathbf{A}^{(m)} = [\mathbf{e}_A, \mathbf{e}_B, \mathbf{e}_C]$, $\mathbf{B}^{(m)} = [\mathbf{f}_A, \mathbf{f}_B, \mathbf{f}_C]$, $\mathbf{C}^{(m)} = [0, 0, 0; 0, 0, 0; 1, 1, 1]$, $\mathbf{D}^{(m)} = [\mathbf{e}_A \times \mathbf{x}_A^{(m)}, \mathbf{e}_B \times \mathbf{x}_B^{(m)}, \mathbf{e}_C \times \mathbf{x}_C^{(m)}]$, $\mathbf{E}^{(m)} = [\mathbf{f}_A \times \mathbf{x}_A^{(m)}, \mathbf{f}_B \times \mathbf{x}_B^{(m)}, \mathbf{f}_C \times \mathbf{x}_C^{(m)}]$, és $\mathbf{F}^{(m)} = [\mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_A^{(m)}, \mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_B^{(m)}, \mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_C^{(m)}]$, $\mathbf{F}_e = [F_{Ae_A}, F_{Be_B}, F_{Ce_C}]^T$, $\mathbf{F}_f = [F_{Af_A}, F_{Bf_B}, F_{Cf_C}]^T$, és $\mathbf{F}_z = [F_{A_z}, F_{B_z}, F_{C_z}]^T$. Az $\mathbf{x}_A^{(m)}$, $\mathbf{x}_B^{(m)}$, és $\mathbf{x}_C^{(m)}$ vektorok kötik össze egymással a feltételezett tömegközéppontot az A, B, és C kerekek talajjal való érintkezési pontjával.

Érdeemes megjegyezni, hogy ha a kis kerekeknek nincs önálló hajtásuk, (1)-ben az \mathbf{F}_e tömb komponensei automatikusan zérusok, ami azt vonja maga után, hogy az A és D blokkok egyszerűen eltűnnek a problémából, és egy közös 6 \times 6-os mátrix inverzének kiszámítása szükséges a probléma megoldásához. E ponttól kezdve az a körülmény, hogy hajtottak-e a kis kerekek vagy sem, további formális matematikai következményekkel már nem jár. Hajtott kis kerekek esetén az (1)-ben adott mátrix pszeudo-inverzének kiszámításával az így meghatározott aktív F_{Ae_A} , F_{Af_A} , F_{Be_B} , F_{Bf_B} , F_{Ce_C} , és F_{Cf_C} erőkompo-

nenseket “megtartjuk”, és a hajtások segítségével kifejtjük azokat a rendszerre, míg a talaj által normális irányban kifejtett kontakt erőket (F_{A_z} , F_{B_z} , és F_{C_z} , amelyek csak akkor valósulnának meg, ha a dinamikai modellünk pontos lenne), egyszerűen “eldobjuk”. A szimulációs számításokban ezek értékét a rendszer tényleges mozgásegyenletei határozzák meg.

A valódi rendszer mozgásegyenlete, melyet a megvalósuló gyorsulások és kényszererők kiszámítására használunk, (1)-hez hasonló szerkezetű, de abban a valódi tömegközéppontot a kerekek pontjaival összekötő vektorok, a modell impulzusnyomaték deriváltja helyett a valódi tömegközéppontra vonatkoztatott impulzusnyomaték deriváltja szerepel(nek), és a feltételezett tömegközéppont $\mathbf{S}^{(m)}$ koordinátái helyett a valódi tömegközéppont \mathbf{S} koordinátái. (Ezeket szerencsére fix geometriai kapcsolat köti össze a modell-adatokkal.) Az egyenletet továbbá át kell rendezni úgy, hogy abban az ismert bemenet most \mathbf{F}_e és \mathbf{F}_f , az ismeretlenek pedig \mathbf{F}_z , $\dot{\mathbf{S}}$ és \ddot{q}_3 lesznek, amennyiben $\dot{\mathbf{P}}$ értékét kifejezzük a szögértékekkel, szögsebességgel, és szöggyorsulással. A felbontás eredménye az alábbi:

$$\begin{bmatrix} 5M\ddot{\mathbf{S}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 5M\mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{D} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_e \\ \mathbf{F}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} [\mathbf{F}_z],$$

ahol a tényleges inercia-mátrix, Θ , egyes elemei szerepelnek $\dot{\mathbf{P}}$ -ban, valamint a $\mathbf{H} = [\mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_A, \mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_B, \mathbf{e}_z \times \mathbf{x}_C, -\Theta^{(3)}; 1, 1, 1, 0]$ tömb, továbbá $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{(m)}$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}^{(m)}$, és $\mathbf{C} = \mathbf{C}^{(m)}$, mivel a modell ezen kinematikai jellegű adatai lehetnek pontosak. (A számításokban figyelembe vettük, hogy a gravitációs erők valódi tömegközéppontra kifejtett összes forgatónyomatéka zéró, valamint azt, hogy a pályasíkra merőleges irányban gyorsulás nem lehet, tehát a gravitációs erő azon komponenseit kompenzálnia kell a normális irányú kontakt erőknek.) A valódi rendszerre vonatkozó egyenletek megoldásánál figyelembe kell venni, hogy azok eleve jelentős mértékben szét vannak castolva: $\dot{\mathbf{S}}$ csak 1. és 2. komponenssel rendelkezik, akárcsak az \mathbf{A} és \mathbf{B} tömbök, a \mathbf{C} tömbnek pedig nincs 1. és 2. komponense. Emiatt $\dot{\mathbf{S}}$ első két nemzéró, ismeretlen komponense \mathbf{F}_z -től függetlenül triviálisan meghatározható, a 3., zéró komponens pedig \mathbf{F}_z -elemeinek összegére ad egy megszorítást. Ez negyedik egyenletként hozzávehető a $\dot{\mathbf{P}}$ három komponensére vonatkozó három egyenlethez úgy, hogy az így kialakuló 4 egyenletben éppen négy ismeretlen, \mathbf{F}_z három komponense, továbbá \ddot{q}_3 szerepel. E felbontás eredménye adott (2)-ben:

$$\begin{bmatrix} -\ddot{q}_3^2 \Theta_{23} \\ \ddot{q}_3^2 \Theta_{13} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{F}_{ABCef} \\ 5Mg_3 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} F_{A_z}^{Real} \\ F_{B_z}^{Real} \\ F_{C_z}^{Real} \\ \ddot{q}_3^{Real} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

A dinamikailag csatolt részrendszer esetén a valódi rendszerre vonatkozó egyenlet [így (2) is] kiegészítendő a vonzott teherre ható kontakt erők járulékaival. Esetünkben ez egy egyszerű, a C keréknél lévő csücsökhöz csatolt, $M/2$ tömegű, $L_0 = 1 \text{ m}$ nyugalmi hosszúságú, $k = 500 \text{ N/m}$ rugóállandójú rugón lévő tömeg volt, amely a sikkal való érintkezésnél $\mu = 5 \text{ Ns/m}$ viszkozus csillapítással mozgott. Ennek mozgásegyenletét külön oldottuk meg, a kocsi-való kapcsolata csak a koordináta-különbségektől függő kontakt erőkön keresztül vétetett figyelembe. Az (1) egyen-

let ilyen kiegészítésére nem volt szükség, hiszen a szabályozás nem tudott csatolt részrendszer létéről, továbbá a modell-egyenletben a gravitációs gyorsulásnak csak z irányú komponense létezett. A következő szakaszban az adaptív szabályozási módszer alapötletét ismertetjük.

3. AZ ELVÁRT-MEGVALÓSULT VÁLASZON ALAPULÓ ADAPTÍV SZABÁLYOZÁS

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_*^d értékre lenne úgy, hogy fentálljon az $r^d = f(r_*^d)$ összefüggés. Egy ilyen helyzet fenttartható 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. [2008c]), amely viszonylag robusztus volt a szabályozott rendszerre érvényes $f()$ függvény speciális sajátosságaira nézve. E robusztusság matematikailag az $f(x)$ függvény x_* körüli affin közelítésével értelmezhető mint a $\tanh(x)$ függvény erős nemlineáris telítődéséből eredő tulajdonság az alábbi módon:

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

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

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

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

Világos, hogy az (3)-ben definiált leképezésnek van egy “megfelelő” (x_*) és egy “hamis” ($-K$) fixpontja, s hogy az A , B , és K szabályozási paraméterek megfelelő 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_* -hoz konvergáljon egy körülötte kialakított vonzási medencén belül. Ennek érdekében elegendő a $|G'| \leq H < 1$ [$0 \leq H < 1$] feltétel biztosítása x_* -ban és környezetében (5) szerint, ami “kontraktív leképezésként” az $(x_n \rightarrow x_*)$ konvergenciára vezethet:

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

Az (6)-ben megfogalmazott idea általánosítása “több bemenetű – több kimenetű” (MIMO – Multiple Input – Multiple Output), azaz többdimenziós rendszerekre a Banach terek (azaz lineáris, normált, teljes metrikus terek) fogalmának használatával történhet, ahol az abszolút értékek ($|\bullet|$) helyett valamilyen norma ($\|\bullet\|$) alkalmazható az eredeti gondolatmenet lényegi átalakítása

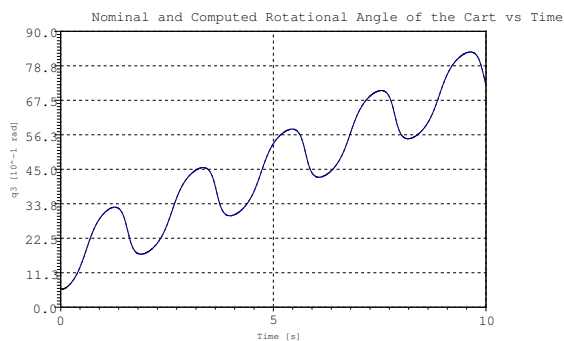
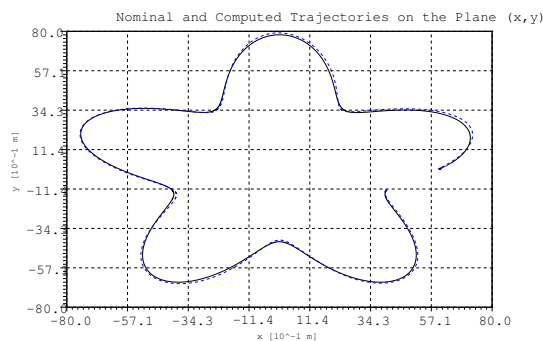
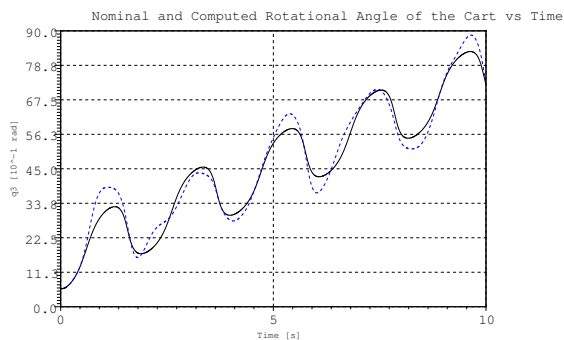
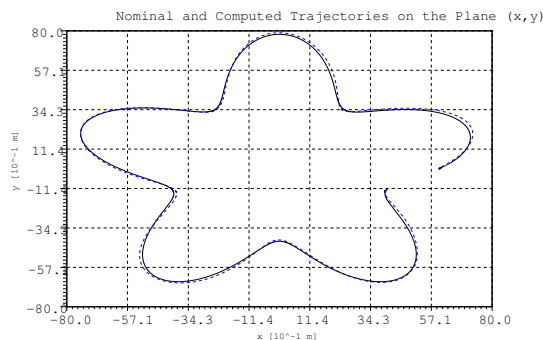
nélkül. Például megfelelhet a következő egyszerű norma: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$: $\|\mathbf{x}\| := \sum_{i=1}^n |x_i|$, ha egy többváltozós “szigmoid függvényt” a következőképp definiálunk: $\mathbf{Z} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ definíció szerint legyen minden komponensében szigmoid, azaz $y_i := Z^{(i)}(x_i)$ $\{i = 1, 2, \dots, n\}$, ami minden egyes komponensben kontraktivitást is jelent: $\forall i \exists 0 \leq M_i < 1$ úgy, hogy ha $|Z^{(i)}(a) - Z^{(i)}(b)| \leq M_i|a - b|$, akkor állítható, hogy $\|\mathbf{Z}(\mathbf{a}) - \mathbf{Z}(\mathbf{b})\| := \sum_{i=1}^n |Z^{(i)}(a_i) - Z^{(i)}(b_i)| \leq [\max_{i=1}^n \{M_i\}] \sum_{j=1}^n |a_j - b_j| \equiv M\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|$, $0 \leq M < 1$. Az itt tekintett jármű adaptív szabályozásában ez az egyszerű idea alkalmazható: a rendszer “válaszának” a \ddot{S}_i^{Real} $i = 1, 2$ és \ddot{q}_3 kordináták felelnek meg, “gerjesztésének” az aktív erőkomponensek, azaz az F_{AeA} , F_{AfA} , F_{BeB} , F_{BfB} , F_{CeC} , és F_{CfC} mennyiségek, míg a szintén “válaszként” kialakuló z irányú lokális kontakt erőkomponenseket (F_{Az} , F_{Bz} , és F_{Cz}) számukra csak annyiban érdekesek, hogy a tervezett mozgás megvalósulásához valamennyinek pozitívnak kell lennie, illetve nagyobbak kell lenniük a talajra jellemző súrlódási együtthatóval szorzott (x, y) síkban lévő aktív komponens normájánál. Jelen közleményünkben a súrlódás mo-dellezésével nem foglalkozunk, hanem feltételezzük, hogy a tekintett mozgásra e feltételek teljesülnek. A \tanh függvény helyett egy hozzá kvalitatív tulajdonságaiban nagyon hasonló szigmoid függvényt, a $\sigma(x) := x/(1 + |x|)$ függvényt alkalmaztuk. A továbbiakban numerikus számítási eredményeket mutatunk be jelentős kanyarokat tartalmazó pályagörbe követésére.

4. SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

A modellbizonytalanságok és a csatolt részrendszer hatása jelentőségének szemléltetése érdekében párban mutatunk nem adaptív és adaptív szabályozásra vonatkozó szimulációs eredményeket. Az alkalmazott adaptív szabályozás megfelelő paraméterei az alábbiak voltak: $K_{Ctrl_{xy}} = -4000$, $B_{Ctrl_{xy}} = 1$, $A_{Ctrl_{xy}} = 10^{-6}$, $K_{Ctrl_{q3}} = -4000$, $B_{Ctrl_{q3}} = 1$, és $A_{Ctrl_{q3}} = 10^{-4}$.

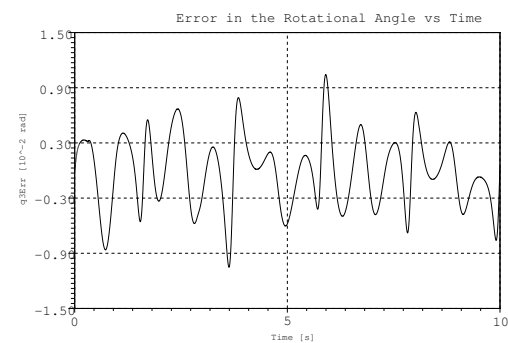
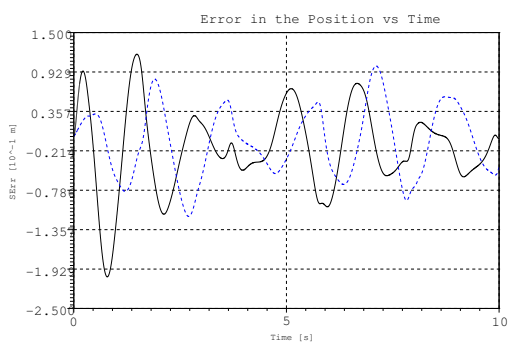
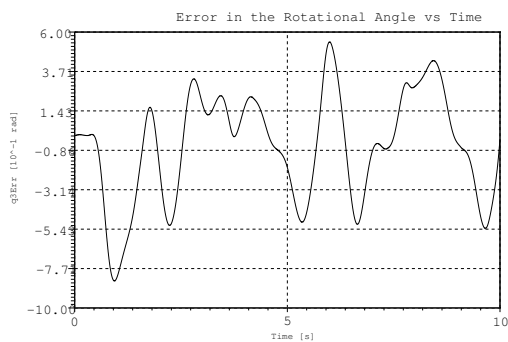
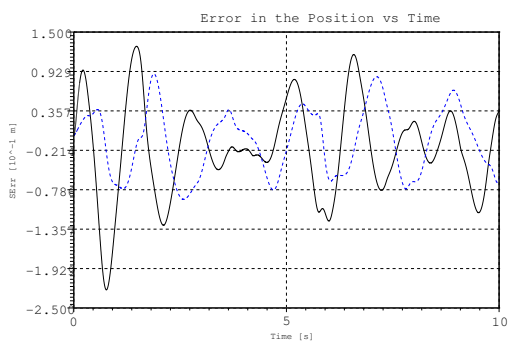
Az első sorozatnál nominális orientáció úgy volt meghatározva, hogy a háromszög alakú jármű egyik éle merőleges legyen a modell tömegközéppont haladás irányára. Mint az az (x, y) síkon kirajzolt mozgáspályákat és a pályakövetési hibákat mutató 2. és 3. ábrán látható, a jelen szabályozás csak kis mértékben redukálja a pályakövetési hibát, bár a kezdeti durva tranziensek lecsengése jelentősebb az adaptív szabályozásban. Az adaptív módszer drasztikusan javít viszont az orientációs helyzet követésén (4. és 5. ábrák). A “nominális mozgás” gyorsulás-értékei, hanem azoknak a kinematikailag megfogalmazott PID típusú pályakövetési stratégiával kiegészített változatai a 6. és 7. ábrákon láthatók. Az ábrák világosan mutatják, hogy a perturbált és pontatlanul modellezett rendszer válasza (azaz a második idő szerinti deriváltak) sokkal jobban megközelíti a kívánt értéket az adaptív, mint a nem adaptív esetben, a javasolt módszer tehát működik. A csatolt részrendszer mozgása a 8. ábra szerint kevésbé “hektikus” az adaptív, mint a nem adaptív szabályozás esetében. A z tengely irányú tasztító erő változása is egyenletesebb ez utóbbi esetben (9. ábra).

Különösen érdekes az adaptív és nem adaptív szabályozás eredményeinek egymással való összevetése nagyon egyszerű nominális mozgáspálya (azaz a kocsiját magával párhuzamos translációja egyenletes szögsebességgel be-



Ábra 2. Az előírt pozíció követése az (x, y) síkon (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

Ábra 4. Az előírt rotációs helyzet követése az (x, y) síkon (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

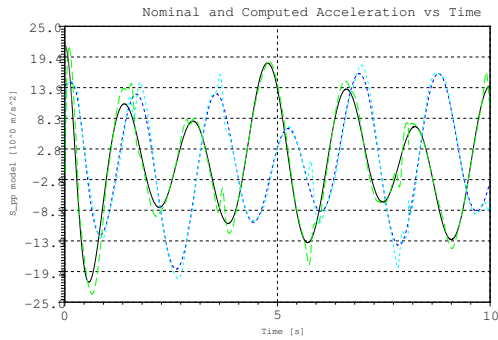
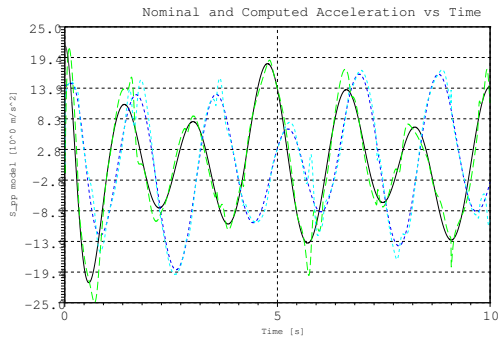


Ábra 3. Az előírt pozíció hibája az (x, y) síkon (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

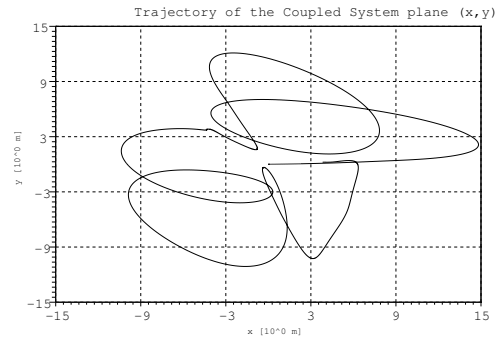
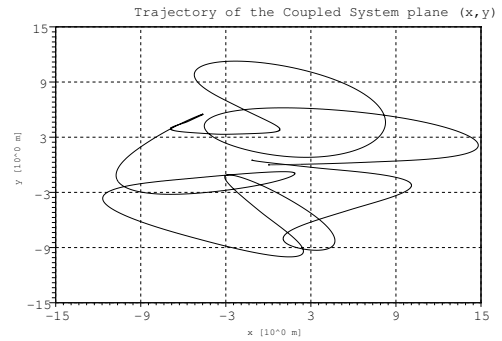
Ábra 5. Az előírt rotációs helyzet hibája az (x, y) síkon (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

járt körpálya) mentén. A 10., 11., 12. és 13. ábrák arról győznek meg, meg hogy míg a nem adaptív szabályozás esetében a csatolt részrendszer mozgása a maga csillapítása ellenére gerjedt, az adaptív szabályozás esetében gerjedés nélkül maradt. E jelenség fizikailag úgy értelmezhető, hogy míg a nominális mozgás adatai (ame-

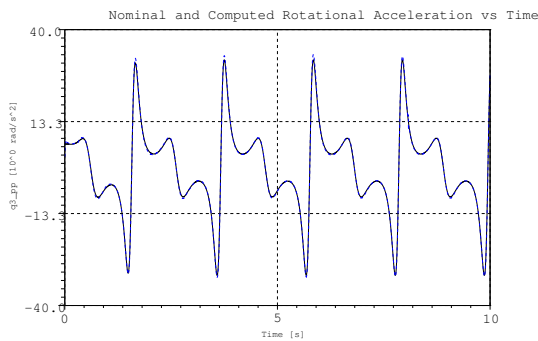
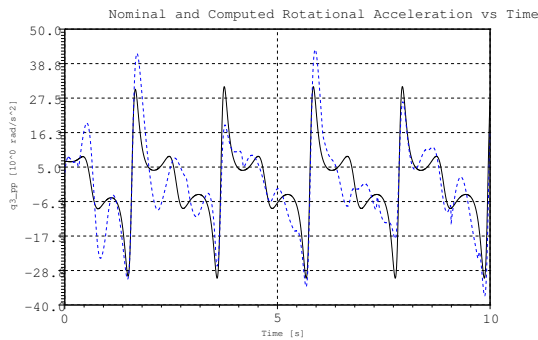
lyek jól meg lettek közelítve az adaptív szabályozással) önmagukban nem hatottak gerjesztőleg a csatolt részrendszer mozgására, a nem adaptív szabályozás PID típusú visszacsatolási paraméterei gerjedést okozhattak, ami mindkét, dinamikailag csatolt részrendszer mozgásában érzékelhetővé vált.



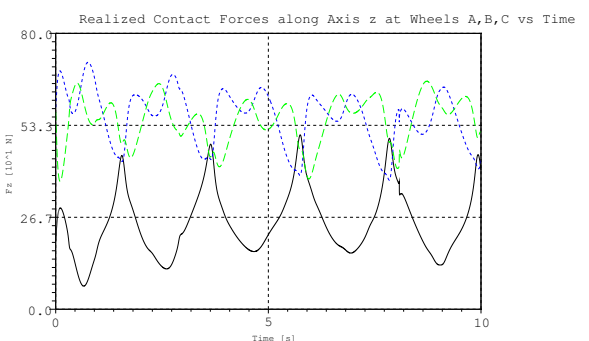
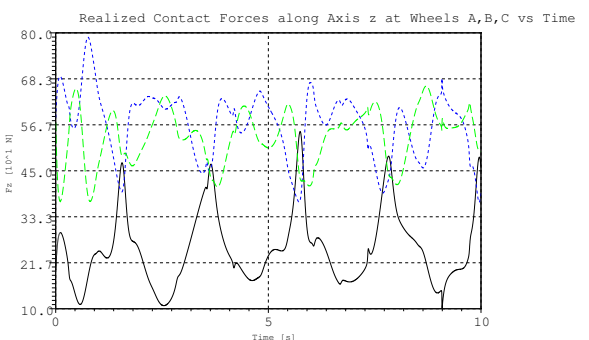
Ábra 6. A \ddot{x} , \ddot{y} gyorsulások (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)



Ábra 8. A vonszolt nehezék (x, y) koordinátái (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)



Ábra 7. A \ddot{q}_3 szöggyorsulások (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

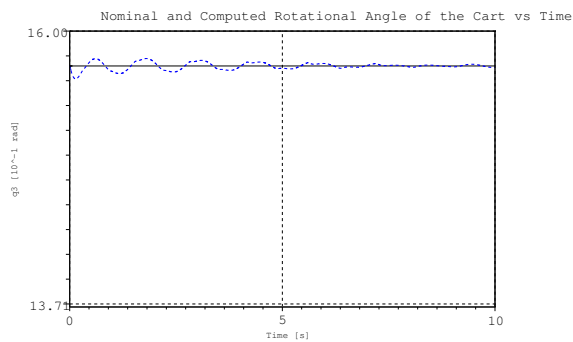
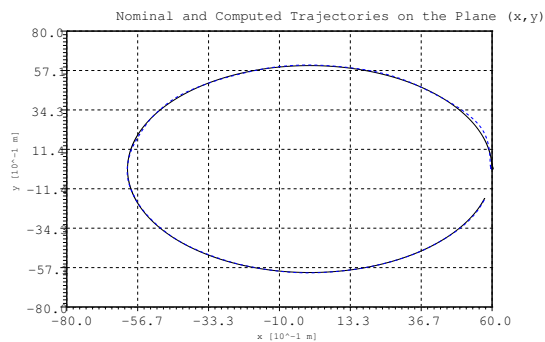
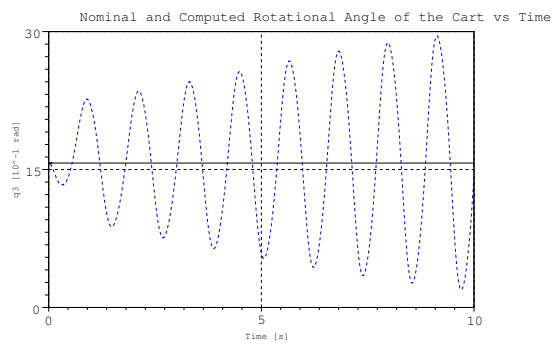
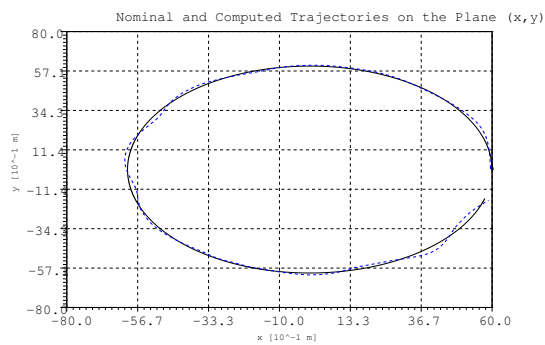


Ábra 9. A z irányú kontakt erők (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

5. A KAPOTT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

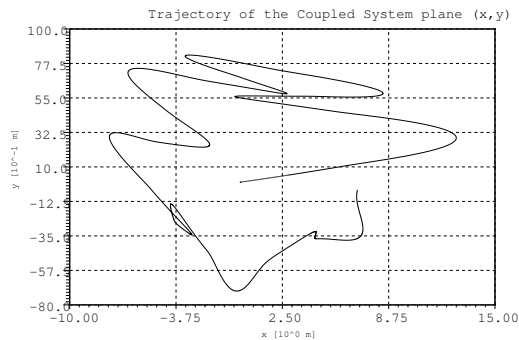
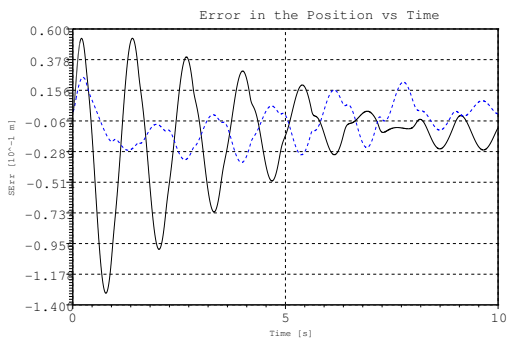
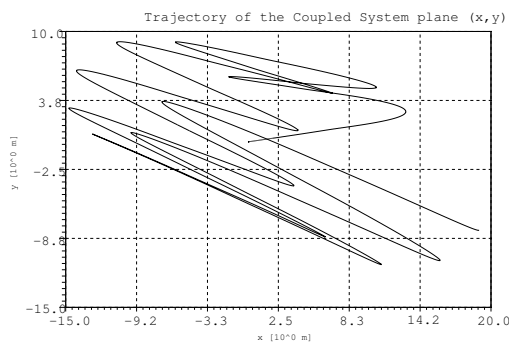
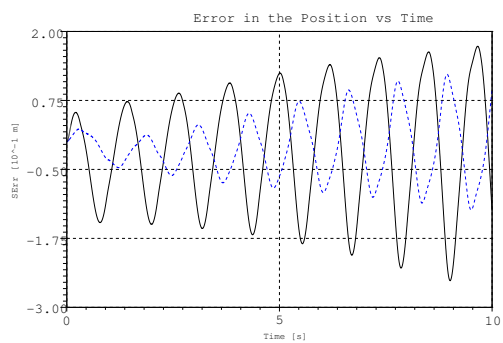
Jelen cikkünkben egy egyszerű, Banach terekben értelmezhető fixpont-transzformáció alapuló adaptív szabályozás alkalmazását mutattuk be ferde pályán a gravitációval szemben mozogni kényszerülő, pontatlanul modellezett, és

nem modellezett részrendszerrel dinamikai kölcsönhatásban álló, hagyományos omnidirekcionális kerekekkel hajtott robotkocsira. Kimutattuk, hogy míg az egyszerű PID típusú szabályozás akkor is gerjeszteni tudja a csatolt részrendszer (rugón vonszolt tömeg) és a kocsii kapcsolatát, ha a bejárandó nominális pálya ilyen gerjesztést



Ábra 10. Az előírt pozíció követése az (x,y) síkon egyenletes sebességgel bejárt körpálya melletti párhuzamos translációra (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

Ábra 12. Az előírt rotációs helyzet követése az (x,y) síkon egyenletes sebességgel bejárt körpálya melletti párhuzamos translációra (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)



Ábra 11. Az előírt pozíció hibája az (x,y) síkon egyenletes sebességgel bejárt körpálya melletti párhuzamos translációra (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

Ábra 13. A vonszolt nehezék (x,y) koordinátái egyenletes sebességgel bejárt körpálya melletti párhuzamos translációra (felső grafikon: nem adaptív, alsó grafikon: adaptív szabályozás)

nem okozna, annak pontosabb megközelítése az adaptív módszerrel elkerüli ezt a gerjedést.

Az alkalmazott módszer igen egyszerű iteráción és a szabályozott rendszer megfigyelésén alapul, nem igényli valamilyen modell paramétereinek becslését, így jóval egyszerűbb, mint bármilyen Kálmán-szűrőn alapuló technika, vagy az irodalomból ismert, robotok mint klasszikus mechanikai rendszerek analitikus modelljeire kidolgozott, Lyapunov függvényt használó adaptív technikák, mint pl. az Adaptív Inverz Dinamika vagy Slotine és Li adaptív szabályozása (Slotine et Li [1991]), amelyekről korábban kimutattuk, hogy érzékenyek külső ismeretlen perturbációkra és a szabályozott rendszer dinamikailag csatolt, de nem modellezett részrendszereivel való kölcsönhatásra (Tar et al. [2008a]). A módszer használata különösen akkor lehet előnyös, ha a csatolt részrendszerről részletesebb ismeretünk nincs, csupán annyi, hogy az valamilyen csillapítást tartalmaz, és egyszerű, sima nominális előírt mozgások arra nincsenek gerjesztő hatással.

Módszerünk hátránya, hogy az lokális vonzási medencékkel dolgozik, amelyek határait pontosan nem ismerhetjük, s a Lyapunov technika elhagyása miatt arra globális stabilitás általában nem biztosítható. Szimulációs vizsgálatokkal viszont behatárolható annak a néhány szabályozási paraméternek a beállítása, amely e lokális stabilitást biztosítja. A módszer bizonytalannal továbbfejleszhető a többdimenziós terekre itt javasolt "szigmoid" függvények irányokra érzékenyebb változatainak használatával.

REFERENCIÁK

- J.M. Holland. Basic Robotics Concepts. Howard W. Sams, Macmillan, Inc., Indianapolis, IN., 1983.
- T. Lozano-Perez. Spatial planning: a configuration space approach. *IEEE Trans. on Computers* Vol. 32, 1983.
- Jean-Jacques E. Slotine, W. Li. Applied Nonlinear Control. Prentice Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- R. M. Murray, S. Sastry. Nonholonomic motion planning. Steering using sinusoids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38 No. 5, pp. 700–716, 1993.
- P. Moutarlier, B. Mirtich, and J. Canny. Shortest paths for a car-like robot to manifolds in configuration space. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 15, No. 1, pp. 36–60, 1996.
- K.T. Simsarian, T.J. Olson, N. Nandhakumar. View invariant regions and mobile robot self-localisation. *IEEE Trans. Rob. Autom.* Vol. 12 No. 5, 1996.
- U. Reif. Best bounds on the approximation of polynomials and splines by their control structure. *Computer Aided Geometric Design*, Vol.17 No.6, pp. 579–589, 2000.
- I. Nagy, L. Vajta. Local trajectory optimization based on dynamical properties of mobile platform. *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2001), Helsinki, Finland, September 16-18, 2001*, pp. 285–290, 2001.
- I. Nagy, A.L. Bencsik. Model-based path planning algorithm in respect of the APF and AEF of the environment. *Proc. of the 7th International Conference on Intelligent Engineering Systems 2003 (INES'03), March 4-6, Assiut-Luxor, Egypt, vol. 2.*, pp. 551–556, 2003.
- I. Nagy. Path planning algorithm based on user defined maximal localization error. *Periodica Polytechnica, BUTE, Hungary*, pp. 43–57, 2005.
- G. Tan, D. Mamady. Real-time global optimal path planning of mobile robots based on modified ant system algorithm. *ICNC 2006, Part II, LNCS 4222*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 204–214, 2006.
- J.K. Tar, I.J. Rudas and K.R. Kozłowski. Fixed point transformations-based approach in adaptive control of smooth systems. *Lecture Notes in Control and Information Sciences 360 (Eds. M. Thoma and M. Morari), Robot Motion and Control 2007 (Ed. Krzysztof R. Kozłowski)*, Springer Verlag London Ltd., pp. 157–166, 2007.
- J.K. Tar, I.J. Rudas, Gy. Hermann, J.F. Bitó, and J.A. Tenreiro Machado. On the robustness of the Slotine-Li and the FPT/SVD-based adaptive controllers. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, Issue 9, Volume 3, September 2008, pp. 686–700, 2008.
- J.K. Tar, I.J. Rudas, J.F. Bitó. Constraints' resolution by optimal trajectory planning for anholonom devices. *Proc. of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2008), 10-13 November 2008, Orlando, FL, U.S.A.*, pp. 1597–1601, 2008.
- J.K. Tar, J.F. Bitó, I.J. Rudas, K.R. Kozłowski, and J.A. Tenreiro Machado. Possible adaptive control by tangent 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.
- I. Gergely. Omnidirekcionális kerekkel meghajtott mobil robot optimális, adaptív szabályozása. Szakdolgozat, BMF-KITT-BGK, 2009.