

Bírálati vélemény

Tar József Kázmér: "Adaptive Control of Smooth Nonlinear Systems Based on Lucid Geometric Interpretation"

(Sima nemlineáris rendszerek adaptív szabályozása szemléletes geometriai interpretáció alapján)

c. MTA doktori (DSc) értekezésről

Az értekezés a sima nemlineáris, elsősorban robotikai/mechatronikai rendszerek adaptív irányítási kérdéseivel foglalkozik, amely területen régóta és ma is intenzív kutatás folyik. A jelölt a Ljapunov-technikák alternatívjaként szemléletes geometriai ihletésű módszerek bevonását (szimplektikus csoport generátorai, minimális operációjú transzformációk, fixpont transzformációk, közelítő SVD, törtrendű deriváltak) javasolja az adaptív irányításokba. Az esettanulmányok szimulációs vizsgálatokat mutatnak be, melyek a SCILAB és SCICOS szimulációs eszközöket használják.

Az angol nyelvű értekezés 183 oldalas, amely fő részre (1-95. oldal), függelékre (96-160. oldal) és referenciákra (161-183. oldal) osztható.

Az értekezés 11 fejezetből (Ch. 1-11) és függelékből (A.1-A.11) áll. A fejezetek példái az A.1-A.9 függelékben lettek elhelyezve, Az A.10 függelék az absztrakt geometriai alapokat (köztük a szimplektikus transzformációkat), az A.11 függelék pedig az SVD geometriai interpretációját mutatja be. A hét tézis rendre a 4. és a 6-11. fejezetekhez kapcsolható.

Az 1. fejezet az értekezés motivációit foglalja össze.

A 2. fejezet az értekezés kutatási metodikáját határolja be.

A 3. fejezet bevezetés, amely a geometriai gondolkodásmód fejlődését mutatja be.

A 4. fejezet röviden bemutatja a robotika kiszámított nyomatékok (CTT) módszerét, Ljapunov stabilitási módszerének alapjait, a globális bemenet/kimenet linearizálás koncepcióját bemenet-affin esetben Lie-derivált felfogásban (GLC). Részletesebben foglalkozik robotok esetén az adaptív inverz dinamika elvű irányítással (AIDC) és annak módosítási lehetőségével integrátor bevonásával, az adaptív Slotine-Lie módszerrel (ASLC) és annak módosítási lehetőségével integrátor bevonásával. Az utóbbi két módszert (normál esetben és a javasolt módosítások mellett) az ú.n. Cart+Beam+Hamper 3-DOF és teljesen aktuált egyszerű modellre mutatja be. A példa egy RRT csuklóképletű nyíltláncú robotnak felel meg. Az AIDC eset szimulációs eredményei az A.1 függelékbe, az ASLC eseté pedig az A.2 függelékbe kerültek.

A (4.4.4) egyenletben szerepel Φ , de nincs definiálva, hogy $\Phi = \hat{H}^{-1}Y$. A (4.4.11) egyenletben Y^T kell, ellenben a (4.4.17) egyenletben Y kell. A (4.5.9) egyenletben $\mathcal{E}$ helyett Y kellene és az argumentumokkal is baj van.

Hiányolható, hogy nincs kihangsúlyozva hogy Slotine-Li módszere a kiszámított nyomatékok, PID szabályozás és csúszó szabályozás ötleteinek fúziója. Különösen hiányolható, hogy a tárgyalás figyelmen kívül hagyja Slotine-Li eredeti választását, amely az integrátort az ú.n. referencia jelbe teszi (tehát Slotine-Li módszerében van integrátor a szabályozási törvényben).

Hibás az a megállapítás, hogy a zavarás csak lineáris függvénye S -nek. Ez ugyanis figyelmen kívül hagyja, hogy a "disturbance" $S^T \tilde{Y}(q, \dot{q}, \tilde{v}, \dot{\tilde{v}}) \tilde{p}$ a (4.5.20) egyenlet szerint (csak ott kimaradtak $\tilde{Y}$ argumentumai), továbbá $S = \dot{e} + 2\lambda e + \lambda^2 \xi$ (4.5.12) szerint és pl. $\tilde{v} = \dot{q}^N + 2\lambda e + \lambda^2 \xi$ (4.5.12) szerint. Ezért a stabilitás nincs bizonyítva. Hasonló mondható (4.4.13)-mal kapcsolatban, mivel $\Phi = \hat{H}^{-1}Y$. Emiatt az 1. Tézis érdemi része nincs bizonyítva.

Az 5. fejezet röviden bemutatja a soft computing (SC) különféle módszereinek és a rendszermodellezésnek a kapcsolatát.

A 6. fejezet abból indul ki, hogy számos fizikai rendszer $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q$ alakra hozható, ahol q az általánosított koordináta, Q az általánosított erő és $H(q)$ a szimmetrikus és pozitív definit általánosított inercia mátrix. Másrészt ha $h(q, \dot{q})$ kicsi, akkor a domináns tag $H(q)\ddot{q}$, és ha $H(q)$ jól approximálható egyszerű technikával, akkor az hasznos lehet az irányítás számára is. Különösen kényelmes a helyzet, ha a rendszernek létezik egy egyszerű, az értekezésben “durvának” (rough) nevezett approximációja, amely kiindulási alapul szolgálhat az adaptív irányítás számára. Természetesen ebben a felfogásban a $h(q, \dot{q})$ nem modellezett része és a zavarás hatása Q -ban közösen kompenzálható az irányításban, nem kell megkülönböztetni őket. A szóbajöhethető módszerek alapjait az A.10 függelék alapozza meg, amelyből különösen lényegesek a szimplektikus geometriai S transzformációk, amelyek kielégítik az $\mathcal{J} = S^T \mathcal{J} S$ feltételt, ahol $\mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}$. Ha teljesül még $\det S = 1$ is, akkor ezek a transzformációk Lie-csoportot alkotnak, amelynek elemei előállnak $\exp(\xi G)$ alakban, ahol G a Lie-csoport generátora (az érintő tér eleme). Ezekből uniform struktúrák képezhetők, amelyek speciális szorzatok összegei. Különösen egyszerű az eset 3D-ben. A megközelítés lehetőséget ad a $H(q)$ mátrix vagy annak approximációjának modellezésére az uniform struktúrák körében, amelyben a paraméterek hangolhatók Simplex/Complex vagy regresszió elvű algoritmusokkal. Az elv egy polírozási feladat keretében kerül bemutatásra harang-alakú felület esetén egy 3-DOF SCARA robottal (TRR csuklóképletű és teljesen aktuált), amelyre csiszoló korong van erősítve. A szimulációs eredmények az A.3 függelékben kerültek tárgyalásra.

A további rész a Hamilton-modellen és a Legendre-transzformáción alapuló megközelítéssel foglalkozik. Jó lett volna ezt jobban megalapozni a függelékben vagy egy bevezető részben, megmutatva hogy miért igaz $H = K + P$ esetén $\dot{p} = -\partial H / \partial q$ és $\dot{q} = \partial H / \partial p$, ami felhasználásra kerül (6.2.1)-ben, valamint folyományában (6.2.2)-ben nemlineáris $x'(x)$ transzformáció esetén, amelynek Jacobi-mátrixa $\det T = 1$ tulajdonságú. A (6.2.3) jobb oldalán hibás a vessző. A jelölt keresi a kapcsolatot Jánossy deformációs elve és a kanonikus transzformáció között, amely garantálja a $\tilde{Q}^{Free} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q^{Free} \end{bmatrix}$ tulajdonságot. Bevezeti a durva approximáció

fogalmát, amelynél az $L = K - P$ Lagrange-függvény alakja $L = 0.5\dot{q}^T M \dot{q} + h^T q$, konstans M inercia mátrixszal és h gravitációs taggal, amelyet a szimplektizáló algoritmussal iterációk sorozatában finomít. Az algoritmus alapja a Gram-Schmidt ortogonalizáció általánosítása antiortogonális terekre (az A.10 függelékben). A lépésenként finomodó deformációkat kumulatív megközelítésnek nevezi, ennek egy lépéses esete a nem-kumulatív megközelítés. A cél és az aktuális $\tilde{Q}^{Free}$ közötti hiba csökkentésére megad egy transzformációt, amely Lie-csoportban nem igényel mátrix invertálást (csak transzponálást és szorzást). Módszert ad a Lie-csoport generátorainak meghatározására és annak biztosítására, hogy a q és p komponensek ne keveredjenek össze. Kihasználva, hogy a generátorok lineáris teret alkotnak, módszert ad a szimmetrikus és a ferde-szimmetrikus generátorok konstrukciójára. Erre alapozva módszert ad a $Gu = 0$ feltétel biztosítására, amely lényeges az $A = SB$ transzformációs feltétel biztosítására, amely kis hibájú cél és aktuális beavatkozásokat megőriz az iteráció során. A módszert az A.4 függelékben illusztrálja szimulációval 3-DOF robot esetén (csuklóképlete TRR és teljesen aktuált). A robot végpontjára szerelt terhelés elasztikus rugóerőként vehető figyelembe.

Az eredményeket a 2. Tézis foglalja össze. Uniformizált struktúrák esetén a model ortogonális mátrixokból plusz a diagonálisban zsugorításokból és nyújtásokból áll, a paraméterszám n -DOF esetben $n + n(n-1)/2$. Azon szimplektikus transzformációk szabad paramétereinek a száma, melyek nem keverik össze a q és p koordinátákat n^2 . A módszerek igénylik egy

egyszerű durva kiindulási modell ismeretét, amely iteratív lépésekben finomítható, közelítve a rendszer elvárt és aktuális viselkedését.

A 7. fejezet az előző fejezetben vizsgált probléma folytatása. Ha a rendszer modellje pontatlan és a szabályozó erre alapozva az előírt viselkedés alapján beavatkozik, akkor ennek hatására kialakul a realizált viselkedés, melyet az előírt közelébe kell hozni. A modell “deformációra” a jelölt az (7.1.4) szerinti $i_n = S_n i_{n-1}$ iterációt javasolja, ahol $S_n \rightarrow I$, melynek teljesülésekor eltűnik a hiba, $f(i_n) \rightarrow i^d$. Ennek biztosítására a Lie-csoportokat hívja segítségül. A minimum operációs transzformáció (MOT) csak egy 2D altérben módosít, az arra ortogonális altérben invariánsan hagyva a viselkedést. Bevezet erre a célra két speciális szimplektikus transzformációt (SST), melynek második verziója a Lorenz-transzformáción alapul (itt $c=1$ helyettesítéssel), lásd (7.1.9-11) és (7.1.12). A nyújtásra/zsugorításra és 2D forgatásra épülő ortogonális transzformáció ezeknél gyengébb tulajdonságú. Az SST $f(i_n) \rightarrow i^d$ konvergenciájának biztosítására abban az esetben, ha $f(x)$ Jacobi-mátrixa pozitív definit és normája jelentősen kisebb 1-nél, megadja a (7.2.18) feltételt, és ennek további javítására a (7.2.19) szabályozott korrekciónak nevezett formulát.

A módszer hatékonyságát a jelölt az A.5 függelékben található példán illusztrálja szimulációval. A példa két egyforma RRT csuklóképzetű A és B robotot tartalmaz, melyek alulaktuáltak (Q_2 nincs szabályozva). Ezen kívül a robotok össze is vannak kötve, melyet rugó és az ütközést modellező nemlinearitás ír le. A kiindulási durva közelítő modellek egyszerűek. A PID jellegű pályakövetés aperiódikusra van választva. Az ebből kialakuló előírt viselkedést a csuklógyorsulás normájától is függő változó súlyozás korrigálja. Az S szimplektikus mátrix csak a szabályozott csuklógyorsulásokat tartalmazza. Kétféle adaptív irányítás kerül összehasonlításra, egy centralizált és egy decentralizált kialakítás. Nem világos az ábrák között, mit kell érteni “Phase Space of Unmod. DOF” alatt. Nem világos az sem teljesen, mi volt az előírt pálya q_1 és q_3 számára. (Talán a szaggatott a fázisterekben?). Sem itt, sem pedig a főrészben nincs megadva, hogyan vesz részt a szimplektikus transzformáció és a közelítő durva modell az irányítási törvényben (amelynek kimenetei Q aktuált komponensei).

Az eredményeket a 3. Tézis foglalja össze.

A 8. fejezet fixpont megközelítést alkalmazó adaptív irányításokkal foglalkozik. A cél annak elérése, hogy az erre alapozott szabályozással a rendszer állapota felvegye a pálya mentén változó $x^d(t)$ állapotot.

Előbb a SISO feladatra ad meg egyszerű geometriai elven alapuló képleteket egy $f(x)$ függvény fixpontjának meghatározására mind csökkenő, mind pedig növekvő esetre (ha a fixpont egy intervallumba már be van határolva és a behatárolt intervallumban egyetlen elhatárolható fixpont létezik, amely műszakilag értelmes). Az elvből származtatja a $h(x|x^d, D_-, \Delta_+)$ és $g(x|x^d, D_-, \Delta_+)$ függvényeket, melyekre alapozza a fixpont iteratív meghatározását a kontraktív leképezések tulajdonságát kihasználva. Az alapok a fejezeten kívül részben az A.6 függelék bevezető részében található, nevezetesen az A.6.1-6 ábrákon vannak illusztrálva. A módszernek megadja egy robusztus változatát is.

A módszert a jelölt az A.6.1 függelékben a lejtőn guruló golyó szabályozása példáján mutatja be szimuláció keretében, amelynél a rotációs csukló tengelye LuGre-típusú dinamikus surlódással rendelkezik. A golyó x aktuális pozíciójának ki kell elégítenie az (A.6.12) negyedrendű hibamodell, ami igényli az $x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{\ddot{x}}$ érzékelését, ami műszakilag nehezen elképzelhető, mert tipikusan csak x mérhető képfeldolgozásra alapozva mintavételelesen, és ennek zajos természete miatt a magasabb rendű deriváltak meghatározása kétséges. A rendszer alulaktuált, a beavatkozó jel $\ddot{\ddot{\ddot{x}}}^{Des}$ értéke az (A.6.1.3) képlet szerinti, amely tartalmazza $x^{(4)Des}$ értékét. Ez felel meg az $f(\cdot)$ függvénynek, amely tartalmazza a tömeg és az inercia

átlagértékét is. A képlet limiteket épít be a φ szögére és a sebességre (ily módon igyekezve csökkenteni a golyó kirepülésének veszélyét). A pálya az x fázis-síkján periódikus, $[-19, -10]$ cm között változik, a maximális hiba kb. 4 mm, ami később 1 mm alá csökken a

szimuláció során. A szabályozás pozitív $x^{(4)Des}$ esetén a g , negatív esetén pedig a h függvényt alkalmazza. Csak feltételezni lehet, hogy a szabályozó mintavételi ideje itt is 1 ms, mint más példánál. Mindazonáltal kétséges, hogy ezt az érzékelés (képfeldolgozás) is tudja tartani. Érdekes lett volna megvizsgálni, milyen a hiba alakulása konstans célhelyzet esetén.

A jelölt a MIMO esetre két megközelítést javasol, az egyik a komponenseket külön-külön kezeli, a másik együttesen. Az utóbbi nagyobb normájú $h_n = f(r_n - r^d)$ esetén gradiens technikához hasonlóan iterál, míg kis normájú h_n esetén megtartja a korábbi beavatkozást.

A módszert az A.6.2 függelékben előbb egy AGV példáján illusztrálja (AGV with omnidirectional wheels), amely vízszintes síkban mozog. A jobb hátsó kerékhez elasztikus terhelés csatlakozik (rugó és tömeg), amely ismeretlen zavarójelet képez a szabályozó szempontjából. A szabályozó számára rendelkezésre áll egy durva dinamikus modell (A.6.2.1) szerint. A szabályozó az (A.6.2.4) szerinti előírt PID elvű gyorsulást valósítja meg fixpontos megközelítéssel zavarás jelenlétében.

A módszer másik illusztrálására az A.6.3 függelékben a Cart-Beam-Hamper rendszer irányítását mutatja be, amely alulaktuált, a lineáris szabadságfok nem irányított ($Q_3 = 0$). Az irányítás számára két gyorsulás van előírva, $\ddot{q}_3^{Des}$ és $\ddot{q}_1^{Des}$. Felhasználva az (A.5.4) modellt,

ezekből meghatározható $\ddot{q}_2^{Des}$, majd Q_1 és Q_2 . A matematikai szingularitások q_1, q_2 -ben megkerülhetők egy biztonságos tartomány ismeretében a fenti lépések mellőzésével, majd a fixpont elvű megközelítés alkalmazható.

Az eredményeket a 4. Tézis foglalja össze.

A 9. fejezet modellreferenciás adaptív irányítással (MRAC) foglalkozik robusztus fixpont transzformáció bevonásával. A pályatervezés alapján előáll a $\ddot{q}^D$ előírt gyorsulás, a referenciamodellből ehhez tartozik egy beavatkozó jel (itt U^D , nem pedig Q^D), amelyet a valódi rendszerre alkalmazva az előírttól eltérő viselkedés áll elő, ezért a bemenetet "deformálni" kell U^{Req} értékűvé a valódi rendszer számára. Ezt alkalmazva a valódi rendszerre annak válasza $\ddot{q}$ lesz, melyet visszahelyettesítve a referencia modellbe az ú.n. realizált beavatkozó jel U^R áll elő. A deformációt úgy kell kialakítani, hogy U^R közeledjen U^D -hez. Az iterációt egy G függvény valósítja meg $U_{n+1}^{Req} = G(U_n^{Req}, U_n^R, U^D)$ alapján lassan változó U^D feltételezéssel, törekedve az U_*^{Req} fixpont elérésére. Az alkalmazási példákban

$$e(t) = q^N(t) - q(t) \text{ hibát és } \xi(t) \text{ hibaintegrált feltételezve a követést } S = \left(\frac{d}{dt} + \Lambda \right)^3 \xi(t) = 0$$

betartásával próbálja biztosítani, amelyhez kapcsolódó $\ddot{q}^D = \ddot{q}^N + \Lambda^3 \xi + 3\Lambda^2 e + 3\Lambda \dot{e}$ választással él. A referencia modell alakja $M^{Ref} \ddot{q} + B^{Ref} \dot{q} + D = Q^{Ref}$, a robot a szokásos $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q$. A referencia modell tulajdonságaiból és a választott koncepció alapján összefüggést ad a kívánt és az aktuális gyorsulás különbségére $\ddot{q}^D - \ddot{q} = (M^{Ref})^{-1} [(H(q) - M^{Ref})\ddot{q} + h(q, \dot{q}) - B^{Ref}\dot{q} - D]$ alakjában. Alkalmas állapotválasztással ez ekvivalens az $\dot{x} = Ax + \Phi$ alakkal, ahol Φ tömören jelöli a nemlineáris kapcsolatot. A lineáris A -hoz tartozó Ljapunov egyenlet P megoldására alapozva választ V Ljapunov függvényt a nemlineáris rendszer számára, és $\dot{V}$ -ban a nemlineáris

$x^T P \Phi = z_{meas} = u - w^T D$ hatás negatívva tételére előírja $z_{meas} = u - \alpha(t) w^T w < 0$ teljesülését, amelyhez megadja az α hangolási szabályát. A módszert az A.7.1 függelékben a Cart+Beam+Hamper példáján illusztrálja.

Egy másik példát mutat be az MRAC irányításra a A.7.2 függelékben, ahol egy RT csukló-képletű struktúrát feltételez, amelynél a második szegmes tömege ismeretlen, rugóval és viszkózus surlódással kapcsolódik az első szegmenshez és nem aktuált ($Q_2 = 0$). A szabályozó csak az első, merevnek feltételezett szegmenst ismeri.

Az eredményeket a 5. Tézis foglalja össze.

A 10. fejezet egy “nagyon durva” és egy jobb közelítő analitikus modell ismeretét feltételezi, és a MIMO rendszer adaptív irányítását ezekre alapozza. A matematikai megfogalmazás egy $f(x)$ függvény esetén, adott x_0 kezdeti érték és x^d előírt érték mellett keresi az alkal-

mas x_* megoldást, amelyre teljesül $x^d = f(x_*)$. Ehhez segítségül hívja a df/dx Jacobi mátrix SVD felbontását, amelynek szinguláris értékeire alapozza az iterációt (10.1.4-5) alakjában. A módszert az A.8 függelékben a kocsira szerelt kettős inga irányítása keretében illusztrálja (RRT robot, alulaktuált). A tengelyek LuGre dinamikus surlódással rendelkeznek, amelyet a szabályozó nem ismer. A (nem nagyon durva) közelítő modell alakja (A.5.4) szerinti, de a paraméterekben pontatlan. Az SVD előre ki lett számítva egy 5×5 méretű raszteren, irányításkor ezek között interpoláció történik.

Az eredményeket a 6. Tézis foglalja össze.

A 11. fejezet a Caputo-féle törtrendű derivált diszkrét approximációjával foglalkozik. Az approximáció a múltbeli viselkedés értékelésén alapul, amelynek paramétereiként a diszkrétizálás lépésközét, a memóriahosszt és a derivált rendjét választja. A módszert mind stabil disszipatív, mind pedig instabil rendszerek modellezésére javasolja. A fizikai rendszert $u^{(\beta, T, \delta)}(t) = -\alpha u(t) + g(t)$ alakban feltételezi, ahol $g(t)$ a gerjesztő erő, és megad számára egy $u(t) = [g(t) - \sum_{s=1}^{T+1} H_s u(t-s)] / (H_0 + \alpha)$ alakú approximációt. Ennek jobb oldalán álló és u értékeit súlyozó M_H mátrix sajátértékeit és sajátvektorait használja fel a kezdeti feltételek lecsengésének minősítésére (exponenciális relaxáció nagy T és kis β esetén, ú.n. “nagyon frakcionális határérték” kisebb T és $\beta \approx 1$ esetén, továbbá ezek közötti ú.n. “közepes értékű” esetek). A módszert az A.9 függelékben az A.5 függelék kocsi+kettősinga rendszerén mutatja be, ahol a durva kezdeti rendszermodell $Q = 10q^{(1+\beta)^{Des}} + 10[111]^T$ alakúra választja a gyors fluktuációk simítása érdekében.

Az eredményeket a 7. Tézis foglalja össze.

Formai észrevételek:

Az értekezés terjedelme (183 oldal) részben indokolt a vizsgált problémák összetett volta, valamint a függelékben található nagyszámú példa és az azt követő nagyszámú referencia miatt. Az értekezés angol nyelvezete és stílusa jó. Gépelési hiba, szóismétlés, fölösleges pont vagy nyelvi pontatlanság az értekezésben csak elvétve akad (például a p.10, p.25, p.44, p.47, p.49, p.74, p.96 oldalakon). Van néhány zavaró képlethiba, ezeket a fejezetek áttekintésekor részben már jeleztem.

Sajnálatos módon a magyar nyelvű tézisfüzet 63 gépelési hibát tartalmaz.

A tézisek értékelése:

A szerző 7 tézist fogalmazott meg. A tézisek értékelésénél fenntartom az egyes fejezeteknél már megtett megállapításaimat, melyeket további észrevételekkel egészítetek ki.

I. Általános észrevételek:

1. Megállapítom, hogy az értekezésben vizsgált sima nemlineáris rendszerek osztálya szorosan kapcsolódik a $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q$ alakú rendszerekhez, ahol q az általánosított koordináta és Q az általánosított erő. Bizonyos esetekben a rendszer alulaktuált lehet, vagyis Q -nak lehetnek olyan komponensei, amelyek irányítással közvetlenül nem befolyásolhatók. A jelölt felteszi, hogy $H(q)$ szimmetrikus és pozitív definit. Ilyen rendszerek első sorban a robotikában fordulnak elő. Ebbe az osztályba nem férnek be földi, légi és vízi járművek. Vízi járművek esetén például a $H(q)$ -nak megfelelő 6×6 -os ú.n. tömeg mártix $M_{RB} + M_A$ alakú, ahol az M_A hozzáadott tömeg (added mass) nem szimmetrikus.
2. A jelölt által javasolt különféle irányítási megközelítések egyik közös jellemzője, hogy alsó szinten $\ddot{q}^D = \ddot{q}^N + PID$ decentralizáltan is implementálható szabályozót használ. A használt terminológiában q^N az előírt pálya, a PID szabályozó bemenete pedig az $e = q^N - q$ hiba. Másrészt, ez a felfogás feltételezi, hogy Q befolyásolható komponensei közvetlenül kimenetei egy fölérendelt centralizált szabályozónak, és Q realizálásával nem kell foglalkozni (pl. az áramszabályozások stb. tranziensei elhanyagolhatók a tipikusan 1ms mintavételi idő mellett). Az értekezés főrészében lévő és a 2-7. tézisekhez kötődő fejezetek adósak maradnak abban, hogy precízen megadják azt a komplett irányítási törvényt, amely $\ddot{q}^D$ -ből meghatározza Q értékét. Ehhez szükség lehet a szerző által jelzett "(nagyon) durva modellre" és a "közelítő modellre". A fejezetekben szereplő elméleti megközelítések jelölésrendszere részben alulspecifikált (pl. mi az i_0 bemenet, vagy mi az $f(x)$ függvény), miközben az elmélet ezekre épül.
3. Az elméletileg igényesebb megközelítések, mint Lie-csoport, szimplektikus csoport, szimplektikus transzformáció az A.10 függelékben lévőnél alaposabb tárgyalást igényeltek volna. Igazi helyük a főrész bevezetőjében lett volna, oldalszám problémák esetén elhagyva pl. az 5. fejezetet. Ezt a hiányt a 6-7. fejezetekben csak részben sikerült pótolni.
4. A különféle módszerek paramétereinek konvergenciájával kapcsolatban kiemелendő, hogy létezik egy identifikációs dilemma, nevezetesen hangolni csak szabályozási hiba jelenlétében lehet, és ha a hiba lecsökken, akkor a paraméterhangolás megáll. Ezért prioritást adva a szabályozási elvárásoknak, rendszerint a becsült paraméter el fog térni a valóditól. Probléma továbbá, hogy ha a paraméterek nem függetlenek és ezen belül nem minimális számúak, akkor a konvergencia sem garantálható. Nyíltlancú merev robotok esetén a minimális paraméterszám (nem tekintve a surlódások paramétereit és ismertnek tekintve a geometriai modell paramétereit) csak a robot csuklóképletétől és Denavit-Hartenberg alakjától függ és lineáris alakban jelenik meg a dinamikus modellben.
5. A kifejlesztett módszerek jól választott közelítő modellek és szabályozó paraméterek esetén is csak lokális stabilitást biztosítanak, a módszerek globális aszimptotikus stabilitása nem várható.

II. A téziseket az alábbi formában és pontosításokkal tudom elfogadni:

1. tézis: Az adaptív inverz dinamikával és az adaptív Slotine-Lie módszerrel kapcsolatban megfogalmazott kritikák nem tartalmaznak tudományos újdonságot robotikában jártas irányítástechnikai szakemberek számára. A Slotine-Lie módszer az ott bevezetett referencia jelbe

ágyazva eredetileg is tartalmaz integrátort: $q_r = q_d + \lambda \int (q_d - q) d\tau$, az irányítási törvény pedig PD szabályozót: $\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) p + K_P(q_r - q) + K_D s$, ahol $s = \dot{q}_r - \dot{q}$. Másrészt nem igaz, hogy a jelölt által adott stabilitás bizonyításban a $2\tilde{p}^T \Phi^T B^T x$ tag lineáris x -ben és ezért kicsivé tehető, mivel Φ is függ x -től. Ezért az 1. tétel nem elfogadható.

2. tétel: A jelölt szimmetrikus és pozitív definit $H(q)$ általánosított inercia mátrixot feltételezve kimutatta, hogy annak modellezése kapcsolatban áll a Lie-csoportokkal és a szimplektikus csoportokkal. Ezekre alapozva modellezési módszereket fejlesztett ki. Egymást erősítő szimplektikus transzformációkat dolgozott ki, amelyek képesek a kezdeti hibákat drasztikusan csökkenteni, majd folyamatosan finomítani. Uniformizált struktúrák esetén a modell ortogonális mátrixokból plusz a diagonálisban zsugorításokból/nyújtásokból áll, a paraméterszám n -DOF esetben $n + n(n-1)/2$. Megmutatta, hogy ha Hamilton-felfogásban q és p alkotja az állapotváltozókat, akkor nem keverve azokat, a szimplektikus transzformációk szabad paramétereinek a száma n^2 .

3. tétel: A rendszer előírt és realizált viselkedésének közelítésére kifejlesztette a minimális operációjú transzformációkat, köztük a speciális szimplektikus mátrixokat, ezek Lorentz-féle változatát, valamint a nyújtó/zsugorító ortogonális transzformációkat. A konvergencia erősítésére kidolgozta a szabályozott korrekció módszerét.

4. tétel: A rendszerek előírt és realizált viselkedésének lokális közelítésére javasolta a fixpont transzformációk bevonását. SISO rendszerekre kidolgozta az egyszerű geometriai elven alapuló paraméteres fixpont transzformációkat lokálisan mind növekvő, mind csökkenő függvények esetén, valamint ezek robusztus változatát. Megadta a módszer általánosítását MIMO rendszerek esetére és annak egy robusztus változatát, amely csak egy paramétert hangol.

5. tétel: Megmutatta, hogy modell referenciás adaptív (MRAC) szabályozókban az elővárt/megfigyelt állapot közelítése az előírthoz és a robusztus fixpont transzformáció egyesíthető egy közös módszerben. A lokális stabilitás támogatására hangolási szabályt dolgozott ki az általánosított erőben ható nem modellezett additív zavarás esetére.

6. tétel: Módszert dolgozott ki MIMO rendszer irányítására, ha változó paraméterű modelljének Jacobi-mátrixáról approximált modell áll rendelkezésre. Ennek lényege, hogy a paramétertérben egy raszter fölött offline elvégzi a Jacobi-mátrix SVD felbontását, és valós időben a tárolt értékek között interpolálva a kifejlesztett algoritmussal redukálja az approximációs hibát az előírt és a megfigyelt állapot között.

7. tétel: Kidolgozta a Caputo-féle törtrendű deriváltak diszkrétidejű közelítését, amely határesetben visszadja a közönséges egészértékű deriváltakat. Megmutatta, hogy a módszerrel stabil disszipatív és instabil rendszerek is modellezhetők.

Alkalmazhatóság:

A jelölt a kifejlesztett módszerek alkalmazhatóságát alkalmasan választott közelítő modellek és szabályozó paraméterek esetén szimulációs vizsgálatok keretében igazolta. A szimuláció az irodalomból ismert kis szabadságfokú nemlineáris mintarendszerekre terjedt ki a szabályozókban nem modellezett zavarások esetén. A rendszerek között voltak alulaktuáltak is. A szimulációk (a lejtőn guruló golyó szabályozása kivételével, amellyel kapcsolatosan korábban már kifejtettem véleményemet) demonstrálták a módszerek alkalmazhatóságát, valamint jó esélyt adnak arra, hogy valós idejű megvalósításuk is eredményes lehet.

Publikáltság:

A tézisek publikálása könyvfejezetekben, folyóiratokban és rangos nemzetközi konferenciák kiadványaiban megtörtént, a tézisek megfogalmazása a vonatkozó publikációkat is megjelöli. A tézisekben szereplő rendkívül nagyszámú (150) publikáció kevés kivétellel többszerzős, az egyszerűs publikációk J20, C31, C55, C77, C84, C103, C115 és C121.

Kérdések:

1. Adja meg a 7. fejezethez kötődően a felsőbb irányítási szint komplett irányítási törvényét, felhasználván az értekezés képleteit és jelöléseit. Az irányítási törvényből legyen egyértelműen rekonstruálható Q számítása. Ennek során adja azt is meg, milyen argumentumra kell alkalmazni a (7.1.9-10)-ben definiált szimplektikus transzformációt. Mellesleg részletkérdés ugyan, de (7.1.10)-hez MATLAB-ban választható egyszerűen $[e^{(3)} e^{(4)} e^{(5)}] = \text{null}([m^{(1)} m^{(2)}]^T)$, amely tetszőleges dimenzióra általánosítható.
2. A különféle módszerek a 2-7. tézisekben igénylik/igényelhetik a durva, nagyon durva és a közelítő modelleket az értekezés szóhasználatával. Mennyire kell ismerni a fizikai rendszer klasszikus $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q$ modelljét, hogy ezeket meg lehessen választani alakra és numerikusan? Adhatók-e általános szabályok? Mi a szerepe ezeknek a $\ddot{q}^D \rightarrow Q$ számítások keretében?
3. A 8. fejezetben mi a fizikai kapcsolat az $f(x)$ függvény és a $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q$ rendszerosztály között? Hogyan kell meghatározni $f(x)$ -et és paramétereit?
4. Hogyan kell megválasztani a 2-7. tézisek szabályozóinak fix (nem adaptív) paramétereit, figyelembe véve a pontossági elvárásokat és a beavatkozó szervek telítési jellegét? Mi az a rendszerosztály, amelyen szabadon lehet kísérletezni ezek meghatározásához? Biztos-e, hogy a kísérletezések során legalább lokálisan stabil marad a rendszer? Mi mondható a szabadságfokok számának növekedésekor?
5. Az utóbbi években a modellalapú irányítások területén is születtek újabb eredmények (Stribeck-surlódás kísérleti meghatározása; adaptív terhelésbecslés stabilitás garanciával, stabil irányítás kotyogás jelenlétében stb.). Ha mérlegre teszi az utóbbi években keletkezett újabb eredményeket a modellalapú adaptív irányítások területén és a 2-7. tézisekben bemutatott módszereket, akkor miben látja a saját módszerei korlátait/előnyeit napjainkban?

Összefoglalva megállapítom, hogy az értekezés fontos, a kutatások középpontjában álló rendszermodellezési és adaptív irányítási kérdésekkel foglalkozott sima nemlineáris robotikai/mechatronikai rendszerek esetén, és a nemzetközi kutatások figyelembevételével is jelentős új saját eredményeket fogalmazott meg, melyeket külföldi és hazai társszerzőkkel közösen könyvrészletekben, folyóiratokban és rangos nemzetközi konferenciákon publikált.

Az értekezés hiteles adatokat tartalmaz. A téziseket (korábbi észrevételeim fenntartása mellett és a 1. tézis kivételével) a fenti megfogalmazásban elfogadom. Az értekezés a CSc fokozat megszerzését követően jelentős eredeti tudományos eredménnyel gyarapította a rendszermodellezési és az adaptív irányítási technikákat, hozzájárult a tudományág fejlődéséhez, ezért az értekezés elfogadását és a nyilvános vita kitűzését javaslom a műszaki tudományok területén.

Budapest, 2011. szeptember 28.

Lantos Béla
a műszaki tudomány (MTA) doktora