
Raport științific sintetic

2011 - 2014

*Proiectarea estimatoarelor pentru sisteme dinamice distribuite
cu structuri specifice*

Proiect PN-II-RU-TE-2011-3-0043

TE 74 / 05.10.2011

Cuprins

1	INTRODUCERE. OBIECTIVE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE	1
1.1	MOTIVAȚIA TEMEI DE CERCETARE ȘI OBIECTIVE.....	1
1.2	DIRECȚII DE CERCETARE.....	1
1.3	MOTIVAȚIA ABORDĂRII SISTEMELOR DISTRIBUITE DE TIP TAKAGI-SUGENO	2
2	REZULTATE OBȚINUTE PENTRU FIECARE DIRECȚIE DE CERCETARE.....	4
2.1	MODELAREA ȘI ANALIZA SISTEMELOR INTERCONECTATE STRUCTURATE.....	4
2.1.1	<i>Sisteme TS conectate în serie.....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Sisteme TS cu comutație.....</i>	<i>6</i>
2.1.3	<i>Articole rezultate.....</i>	<i>7</i>
2.2	PROIECTAREA ESTIMATOARELOR PENTRU SISTEME DISTRIBUITE STRUCTURATE.....	7
2.2.1	<i>Sisteme TS discrete</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Sisteme neliniare cu parametri periodici și sisteme neliniare cu comutație</i>	<i>8</i>
2.2.3	<i>Condiții ne-pătrăcite de stabilizare a modelelor descriptor TS.....</i>	<i>10</i>
2.2.4	<i>Articole rezultate.....</i>	<i>12</i>
2.3	TESTARE ȘI VALIDARE.....	14
2.3.1	<i>Braț de robot cu două grade de libertate</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Modelare fuzzy și control pentru infecția cu virusul HIV</i>	<i>15</i>
2.3.3	<i>Proiectarea unui estimator și a regulatorului pentru o macara (3D crane)</i>	<i>15</i>
2.3.4	<i>Estimarea parametrilor și stărilor unor sisteme electromecanice neliniare</i>	<i>15</i>
2.3.5	<i>Aplicații experimentale ale estimatoarelor și reglatoarelor fuzzy TS pentru un sistem electromecanic neliniar</i>	<i>16</i>
2.3.6	<i>Articole rezultate.....</i>	<i>17</i>
3	BIBLIOGRAFIE.....	19

1 Introducere. Obiective și direcții de cercetare

1.1 Motivația temei de cercetare și obiective

Multe sisteme fizice distribuite, de exemplu sistemele de procesare a materialelor, rețelele de comunicații sau de transport, sau rețelele inteligente sunt compuse din subsisteme de dimensiuni mai mici interconectate. Aceste sisteme, respectiv interconexiunile existente au de obicei o structură specifică, în sensul că nu toate subsistemele într-un sistem interconectat pot fi conectate la toate celelalte subsisteme.

Obiectivul major al proiectului este de a dezvolta noi metode și algoritmi pentru estimarea stărilor și monitorizarea sistemelor dinamice distribuite cu structuri specifice, prin exploatarea structurii existente, în vederea dezvoltării unor condiții de proiectare mai relaxate a estimatoarelor și a reguletoarelor.

Pentru a analiza eficient dinamica neliniară a sistemelor se utilizează modele fuzzy de tip Takagi-Sugeno (TS), iar structura distribuită se va reprezenta printr-o abordare obținută din teoria grafurilor.

1.2 Direcții de cercetare

Activitățile desfășurate se încadrează în cele trei direcții majore de cercetare propuse în proiect și anume:

1. *Modelarea și analiza sistemelor interconectate structurate*: analiza structurilor specifice, combinarea proprietăților dinamice și structurale ale sistemelor distribuite, investigarea proprietăților sistemelor cu conexiuni structurate. Prima direcție combină teoria grafelor și teoria sistemelor dinamice fuzzy-TS. Obiectivul este de a realiza un cadru în care structurile distribuite să poată fi reprezentate eficient, inclusiv în ceea ce privește dinamica neliniară care caracterizează sistemul cât și interconexiunile dintre ele.
2. *Proiectarea estimatoarelor pentru sisteme distribuite structurate*: pregătirea cadrului pentru estimare, modelarea TS a sistemelor distribuite structurate, metode pentru proiectarea estimatoarelor, relaxarea condițiilor de proiectare pe baza structurii. Obiectivul celei de-a doua direcții este dezvoltarea unor metode noi de proiectare a estimatoarelor și algoritmi pentru sisteme distribuite dinamice neliniare structurate. Pentru aceasta se utilizează sinteza Lyapunov pornind de la rezultatele existente care se bazează pe funcții Lyapunov pătratice și ne-pătratice.

3. *Testare și validare*: testare pe exemple academice, determinarea stadiului actual al aplicațiilor, testarea pe aplicații reale. Obiectivul acestei direcții de cercetare este testarea și validarea cadrului dezvoltat și a metodelor, întâi în simulare apoi în experimente de laborator și aplicații industriale, care să demonstreze fezabilitatea, fiabilitatea și robustețea metodelor.

1.3 Motivația abordării sistemelor distribuite de tip Takagi-Sugeno

Analiza și proiectarea sistemelor distribuite au fost investigate deoarece prezintă mai multe avantaje, dintre care menționăm costuri de calcul reduse, flexibilitate, toleranța la defecte, și o analiză mai eficientă [1], [2], [3], [4], [5]. În literatură, sistemele distribuite considerate cel mai des sunt sisteme liniare, invariante în timp, respectiv sisteme stohastice. În consecință, regulatoarele și estimatoarele utilizate pentru aceste sisteme sunt regulatoare și estimatoare liniare, filtre Kalman [6], [7], sau filtre de particule [8]. Analiza stabilității respectiv proiectarea estimatoarelor și a regulatoarelor pentru sisteme neliniare a fost investigată în ultimii ani mai mult în cazuri speciale în care rezultate din teoria sistemelor liniare și invariante în timp pot fi folosite direct [9], [10], [11].

Trecerea de la sisteme liniare invariante în timp la sisteme neliniare prezintă mai multe probleme. Astfel, deși un sistem neliniar poate fi aproximat de către unul liniar în diferite puncte de operare, concluziile trase pentru aceste puncte de operare sunt valabile într-un spațiu extrem de restrâns. Mai mult, stabilitatea globală, așa cum este definită pentru sisteme liniare de cele mai multe ori nu are sens pentru sisteme neliniare [12]. Pentru a trece peste aceste dificultăți, au fost dezvoltate modele neliniare care exploatează proprietățile sistemelor liniare. Sistemele fuzzy de tip Takagi-Sugeno [13] sunt astfel de sisteme, reprezentând modele neliniare ca fiind combinații neliniare convexe a unor sisteme liniare care sunt valide local. Ele pot reprezenta exact o clasă de sisteme neliniare [14], respectiv pot aproxima cu o acuratețe dată orice sistem neliniar [15]. În acest proiect, considerăm sisteme de tip Takagi-Sugeno descrise în spațiul stărilor, de forma

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sum_{i=1}^r w_i(z)(A_i x + B_i u + a_i) \\ y &= \sum_{i=1}^r w_i(z)(C_i x + d_i)\end{aligned}$$

în timp continuu, respectiv

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^r w_i(z(k))(A_i x(k) + B_i u(k) + a_i)$$

$$y(k) = \sum_{i=1}^r w_i(z(k))(C_i x(k) + d_i)$$

în timp discret, unde k este momentul de timp, r este numărul modelelor locale în compoziția sistemului, A_i , B_i , și C_i sunt matricele locale, a_i și d_i sunt biasuri, z este variabila de premisă, care în general poate depinde de stări (x), de intrări (u) sau de ieșiri (y). Funcțiile w_i sunt funcții neliniare, dar care au proprietatea de convexitate, adică:

$$\sum_{i=1}^r w_i(z(k)) = 1 \text{ și } w_i(z(k)) \geq 0, \forall k.$$

Condițiile de stabilitate, respectiv de proiectare a estimatoarelor și a reguletoarelor pentru astfel de sisteme sunt dezvoltate folosind metoda directă a lui Lyapunov [16], [17]. Deși pentru sisteme centralizate au fost folosite funcții Lyapunov pătratice, pătratice pe porțiuni, iar în ultimii ani, ne-pătratice, pentru sisteme distribuite, funcțiile folosite au fost reduse la funcții pătratice [18], [19], [20]. Acesta este din cauza că, condițiile de analiză respectiv de proiectare se încercă a fi formulate ca și inegalități matriceale liniare, pentru care există algoritmi eficienți de testare a fezabilității.

Totuși, o problemă inherentă este că dimensiunea ecuațiilor poate fi exponențială în numărul de variabile, iar abordările care folosesc funcții Lyapunov ne-pătratice de obicei rezultă într-un număr mare de ecuații. Astfel, pentru sisteme distribuite, mari, algoritmii existenți nu sunt fezabili din punct de vedere a costurilor de calcul. Mai mult, condițiile existente sunt caracteristice cazului în care structura și modelele locale a modelului sunt fixe.

În cadrul acestui proiect au fost propuse următoarele soluții pentru problemele enumerate mai sus:

- În cadrul sistemelor distribuite de tip TS nu există încă cercetări care vizează condiții dezvoltate pe baza funcțiilor Lyapunov ne-pătratice. Lipsa acestora se datorează pe de o parte complexității conexiunilor, dar de pe altă complexitatea condițiilor care ar rezulta. Totuși, pe baza ultimelor cercetări, condițiile rezultante pot fi simplificate astfel încât să fie fezabile din punct de vedere a costurilor de calcul.
- Cercetările actuale vizează sisteme distribuite de tip TS care pot fi reprezentate printr-un graf complet, adică fiecare subsistem influențează și este influențat de fiecare alt subsistem. În mod natural, această abordare rezultă în condiții

generale, dar tocmai din cauza aceasta, conservative. Această proprietate poate fi redusă considerând o reprezentare de grafuri non-complete. În acest graf, vârfurile reprezintă subsisteme, iar arcele legăturile dintre ele.

- Noțiunile din teoria grafurilor când sunt folosite la studiul sistemelor dinamice în general sunt restrânse la sisteme cu o dinamică extrem de simplă, liniară, respectiv la conexiuni constante. După cunoștințele noastre, nu există cercetări referitoare la cazul în care această conexiune este dinamică, depinde de stări sau de semnale externe, așa cum ar fi în cazul sistemelor TS.
- Grafurile dinamice pot fi folosite pentru a reprezenta sisteme variabile în timp, adică la care se pot adăuga subsisteme, sau sisteme cu comutație.

2 Rezultate obținute pentru fiecare direcție de cercetare

2.1 Modelarea și analiza sistemelor interconectate structurate

Pentru analiza și proiectarea sistemelor TS [13], se utilizează metoda directă Lyapunov, cu funcții pătratice [21], [22] pătratice pe porțiuni [23], sau, mai recent, ne-pătratice [24], [25], [26], [27]. Pe baza acestor funcții Lyapunov, condițiile de stabilitate sau de proiectare sunt în general obținute sub forma inegalităților liniar matriciale (LMI). Deși utilizarea funcțiilor Lyapunov ne-pătratice a adus o reală îmbunătățire în domeniul sistemelor discrete [24], [28], [29], [30], acestea au fost utilizate de asemenea și pentru modele TS continue [31], [32], [33], [26]. Pentru a reduce conservativitatea condițiilor, s-au introdus proprietăți ale funcțiilor de apartenență [34] și complexitatea LMI-urilor a fost redusă.

Multe sisteme fizice, ca de exemplu sistemele energetice, rețelele de comunicații, sistemele economice, rețelele de trafic, de irigație, etc., sunt compuse din subsisteme interconectate de dimensiuni mai reduse. Analiza și proiectarea legilor de control pentru astfel de sisteme au fost, recent, subiectul a numeroase cercetări [35], [36], [37], [38], [39], [40].

Analiza stabilității sistemelor TS distribuite se bazează în principal pe existența unei funcții Lyapunov comune pentru fiecare subsistem [41], [42]. Cele mai multe rezultate utilizează presupunerea că numărul subsistemelor și unele limitări ale termenilor de interconexiune sunt cunoscute *a priori* și analiza subsistemelor se face în paralel. De exemplu, un prim rezultat a fost formulat în [41] și relaxat în [43]. În aceste abordări, condițiile LMI pentru determinarea stabilității sistemelor individuale sunt rezolvate în

paralel și apoi se verifică stabilitatea întregului sistem. Pentru sisteme hibride liniare – fuzzy, a fost propusă o metodă similară în [42]. Pentru sisteme distribuite TS cu consecvenți afini, dar termeni liniari de interconexiune între subsisteme, a fost dezvoltată o abordare bazată pe funcții Lyapunov pătratice pe porțiuni în [39]. Analiza stabilității sistemelor TS distribuite cu incertitudini a fost investigată în [40].

2.1.1 Sisteme TS conectate în serie

Toate rezultatele menționate mai sus presupun că oricare două subsisteme pot fi interconectate. Deși această presupunere face ca rezultatele să fie aplicabile în cazuri generale, condițiile sunt conservative.

Cercetările referitoare la sisteme TS conectate în serie obținute în cadrul acestui proiect au dus în principal la următoarele rezultate:

- S-au dezvoltat condiții de stabilitate pentru sisteme TS conectate în serie, adică, sisteme TS distribuite în care fiecare subsistem este conectat numai cu cei doi vecini (Figura 1).

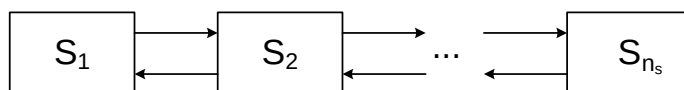


Figura 1. Subsisteme conectate în serie

Legăturile între subsisteme se realizează prin intermediul variabilelor de stare, respectiv cele n_s subsisteme sunt descrise de modelele TS:

$$\dot{\mathbf{x}}_l = \sum_{i=1}^{r_l} w_i^l(\mathbf{z}_l) (\mathbf{A}_i^l \mathbf{x}_l + \mathbf{A}_i^{l,l-1} \mathbf{x}_{l-1} + \mathbf{A}_i^{l,l+1} \mathbf{x}_{l+1} + \mathbf{B}_i^l \mathbf{u}_l)$$

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^{r_l} w_i^l(\mathbf{z}_l) \mathbf{C}_i^l \mathbf{x}_l$$

pentru $l = 1, 2, \dots, n_s$, unde n_s reprezintă numărul de subsisteme.

- Această abordare a fost extinsă pentru proiectarea legilor de control și a estimatoarelor de stare. Exploatând structura sistemului au fost obținute condiții mai puțin conservative. Mai mult, pentru dezvoltarea lor, s-au utilizat funcții Lyapunov ne-pătratice. S-au obținut și demonstrat condiții suficiente pentru stabilitate, pentru proiectarea estimatoarelor și legilor de control, verificate pe numeroase exemple numerice.

Rezultatele obținute sunt extinse pentru sisteme conectate în serie la sisteme mai generale, interconectate. Alte cazuri speciale în curs de investigație sunt sistemele distribuite cu conexiuni simetrice și sistemele distribuite omogene.

2.1.2 Sisteme TS cu comutație

Sistemele cu comutație sunt în mod obișnuit descrise ca sisteme dinamice continue și discrete împreună cu interacțiunile lor. Pentru aceste sisteme, [44], se poate analiza stabilitatea întregului sistem considerând că secvențele de comutație nu sunt cunoscute, se poate determina o lege de stabilizare, sau se pot proiecta estimatoare sau controlere.

Sistemele TS cu comutație au fost investigate în ultimele decenii în special în cazul continuu, în care stabilitatea se bazează pe funcții Lyapunov pătratice [45], [46] sau pătratice pe porțiuni [47], [48]. Deși sunt disponibile rezultate pentru sisteme liniare cu comutație [44], pentru sisteme discrete TS există foarte puține rezultate [29].

Pentru sisteme TS cu comutație, în cadrul proiectului s-au obținut următoarele rezultate:

- S-a analizat stabilitatea sistemelor neliniare cu comutație reprezentate ca sisteme fuzzy Takagi-Sugeno, respectiv posibilitatea de a stabili un sistem cu comutație printr-o lege de comutație. S-au determinat condiții relaxate LMI (inegalități liniar-matriciale) pentru analiza stabilității sistemelor TS cu comutație. S-a utilizat o funcție Lyapunov ne-pătratică pentru diferite exemple. S-a presupus că deși secvența de comutație exactă nu este cunoscută, mulțimea comutațiilor admisibile este disponibilă. Mai mult, odată ce un sub-sistem este activat, va rămâne activ pentru un număr de eșantioane pentru care se cunosc limitele. Condițiile de stabilitate determinate arată că sistemul cu comutație este stabil dacă funcția Lyapunov descrește de-a lungul unei căi de lungime α . Dacă secvența de comutație poate fi aleasă sau se caută o secvența de comutație care să stabilizeze sistemul, condițiile pot fi relaxate. Condițiile LMI pot fi de asemenea relaxate prin sume duble în funcția Lyapunov sau prin sume multiple.
- Pentru stabilizarea sistemelor discrete TS cu comutație s-au determinat două seturi de condiții utilizând două tipuri de funcții Lyapunov ne-pătratice. Sistemul cu comutație a fost reprezentat sub forma unui graf orientat și s-a presupus că setul de secvențe de comutație admisibile este cunoscut, dar nu se cunoaște *a priori* secvența exactă de comutație. Dacă se iau în considerare secvențele de comutație admisibile a fost posibil să se determine condiții pentru stabilizarea unor sisteme cu modele locale ne-controlabile. Metodele dezvoltate au fost

testate cu rezultate bune pentru exemple numerice care ilustrează valabilitatea rezultatelor teoretice.

2.1.3 Articole rezultate

Articole în reviste internaționale

1. **Zs. Lendek, P. Raica**, Bart De Schutter, Robert Babuska, “Analysis and design for continuous-time string-connected Takagi-Sugeno systems”, *Journal of Franklin Institute*, 351 (7), pag. 3577–3592, July 2014.
2. **Zs. Lendek, P. Raica**, J. Lauber and T. M. Guerra, „Finding a stabilizing switching law for switching TS models”, trimis spre publicare la *Systems & Control Letters*, 2013

Articole publicate în volume de conferințe internaționale

3. **Zs. Lendek**, J. Lauber, T. M. Guerra, **P. Raica**, “Stability analysis of switching TS models using alpha-samples approach”, in *Proceedings of the 2013 IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Science*, pag. 207-211, Chengdu, China, September 2013.
4. **Zs. Lendek, P. Raica**, J. Lauber and T. M. Guerra, „Nonquadratic stabilization of switching TS models”, *Proceedings of the 19th World Congress, the International Federation of Automatic Control*, Cape Town, South Africa, August 24-29, pag. 7976- 7981, 2014.

2.2 Proiectarea estimatoarelor pentru sisteme distribuite structurate

2.2.1 Sisteme TS discrete

Pentru sisteme TS discrete, funcțiile Lyapunov ne-pătratice au dus la o reală îmbunătățire în condițiile de proiectare [27],[30], [31], [32]. S-a arătat că soluțiile obținute cu funcții Lyapunov ne-pătratice includ și extind setul de soluții obținute în cadrul pătratic. Funcțiile ne-pătratice au fost extinse la funcții Lyapunov cu sumă dublă în [30] și mai târziu la funcții Lyapunov polinomiale în [33],[34],[35]. Un tip diferit de îmbunătățire în cazul discret a fost dezvoltat în [28], în care condițiile au fost obținute prin înlocuirea clasicei variații pe un eșantion a funcției Lyapunov cu variația pe mai multe eșantioane (α -sample variation). Pentru un model fuzzy-TS există metode bine definite și algoritmi pentru proiectarea observerelor care estimează stările

nemăsurabile. În general metodele de proiectare pentru estimatoare conduc de asemenea la o problemă de fezabilitate a inegalităților liniar matriciale (LMI).

Pentru proiectarea legilor de control și a estimatoarelor pentru modele TS discrete, în [36] s-a utilizat un regulator cu întârziere ne-pătratic cu sumă dublă. Această metodă a fost generalizată pentru proiectarea estimatoarelor în [37] dar nu și pentru proiectarea reguletoarelor. De fapt, metoda de proiectare a reguletoarelor conduce la un număr mare de probleme LMI, crescând astfel efortul de calcul.

Activitățile desfășurate în cadrul cercetărilor curente s-au concentrat în special pe următoarele aspecte:

- A fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu întârziere care conduce la condiții de proiectare mai relaxate și la costuri de calcul reduse.
- A fost propus un cadru general de utilizare a funcțiilor Lyapunov ne-pătratice cu întârziere pentru proiectarea reguletoarelor. Pentru modele TS discrete, există studii anterioare [49] care propun reguletoare și estimatoare cu întârziere, în cadrul ne-pătratic. Metodele de proiectare a estimatoarelor au fost generalizate apoi în [50], dar proiectarea reguletoarelor a avut dezavantajul unui număr mare de LMI. Datorită utilizării funcțiilor Lyapunov cu întârziere, au apărut noi posibilități pentru obținerea unor condiții de proiectare relaxate. Obținerea unei structuri corespunzătoare a legii de control reduce într-o mare măsură conservativitatea rezultatelor. Cheia a fost determinarea unei soluții adecvate care este compatibilă cu programele actuale de rezolvare a acestui tip de probleme. S-au determinat noi posibilități de proiectare a reguletoarelor pe baza valorilor trecute ale stării, pentru o clasă largă de sisteme neliniare. În plus, în cadrul propus, sistemele cu întârziere pot fi studiate ușor. Rezultatele au fost extinse pentru control robust H^∞ și la variația pe mai multe eșantioane (*α -sample variation*), în mod similar cu [51].

2.2.2 Sisteme neliniare cu parametri periodici și sisteme neliniare cu comutație

S-a abordat, de asemenea, o clasă de sisteme neliniare cu parametri periodici. Astfel de modele se găsesc în numeroase domenii, cum ar fi industria auto, aeronautică sau în sisteme numerice de control a proceselor industriale [36], [37], [38], [39]. Aceste sisteme pot fi reprezentate prin modele cu comutație periodică. În ultima decadă, astfel de sisteme au fost investigate mai ales în cazul continuu unde stabilitatea se bazează pe utilizarea unei funcții Lyapunov pătratice [40], [41], [42], [43] sau pătratice pe porțiuni

[47], [52]. Deși există rezultate pentru sisteme discrete liniare cu comutație [44], pentru sisteme TS discrete există doar un număr mic de rezultate [53], [29].

În acest context, cercetarea curentă a fost orientată spre următoarele probleme:

- A fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu comutație pentru analiza stabilității modelelor fuzzy-TS periodice. Această funcție este utilă pentru demonstrarea stabilității sistemelor fuzzy-TS periodice cu modele locale instabile și chiar cu subsisteme instabile.
- S-a analizat stabilitatea și condițiile de proiectare ale reguletoarelor pentru sisteme discrete TS. Pentru a obține condițiile a fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu comutație. În literatura anterioară, analiza stabilității modelelor TS s-a bazat pe stabilitatea fiecărui model local, iar pentru proiectarea reguletoarelor era necesar ca fiecare model local să fie controlabil. Utilizând condițiile determinate cu această funcție Lyapunov au fost proiectate legi de control pentru sisteme cu comutație în cazul în care modelele locale ale subsistemelor nu sunt stabile sau stabilizabile.
- S-a propus și s-a dezvoltat un observer cu comutație pentru modele TS periodice. Pentru obținerea condițiilor de proiectare s-a utilizat o funcție Lyapunov ne-pătratică. Această abordare a fost utilă pentru proiectarea estimatoarelor pentru sisteme TS periodice cu modele locale ne-observabile.
- O altă problemă studiată a fost analiza stabilității și proiectarea reguletoarelor pentru modele TS discrete periodice. Pentru a dezvolta condițiile de stabilitate, respectiv de proiectare, s-a utilizat o funcție Lyapunov ne-pătratică definită în momentele în care are loc comutația. Condițiile obținute au fost sub forma inegalităților bi-liniar matriciale (BMI) care pot fi rezolvate fie utilizând aplicații de calcul dedicate pentru BMI sau proceduri iterative. Cu ajutorul condițiilor obținute s-a putut demonstra stabilitatea sistemelor TS periodice cu modele locale instabile și stabilizarea unui sistem periodic cu modele locale necontrolabile.
- Pentru sisteme cu comutație reprezentate prin modele fuzzy-TS, în cadrul acestui proiect s-au dezvoltat condiții relaxate de proiectare a estimatoarelor. S-a utilizat o funcție Lyapunov ne-pătratică și variația acesteia de-a lungul unor secvențe de comutație posibile. S-a presupus că deși secvența de comutație nu este cunoscută și nu poate fi influențată direct, mulțimea tuturor secvențelor de comutație admisibile este cunoscută. De asemenea, s-a considerat că dacă un subsistem este activat, acesta va rămâne activ un număr de eșantioane de timp pentru care

limitele minime și maxime sunt cunoscute. Condițiile dezvoltate și demonstrate au fost verificate pe exemple numerice care au arătat valabilitatea teoriei, modul de aplicare, precum și avantajele și dezavantajele metodei.

2.2.3 Condiții ne-pătratice de stabilizare a modelelor descriptor TS

Cadrul de analiză a stabilității sistemelor fuzzy TS utilizând funcții Lyapunov pătratice a fost extins la o clasă mai largă de modele TS în forma descriptorilor, [54], [55]. Un sistem continuu neliniar în forma descriptor este descris de:

$$E(\mathbf{x}(t))\dot{\mathbf{x}}(t) = A(\mathbf{x}(t))\mathbf{x}(t) + B(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = C(\mathbf{x}(t))\mathbf{x}(t)$$

unde $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ este vectorul de stare, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ este vectorul de intrare, și $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^p$ este vectorul de ieșire. $A(\mathbf{x}(t))$, $B(\mathbf{x}(t))$, $C(\mathbf{x}(t))$ sunt matrici de dimensiuni corespunzătoare, iar $E(\mathbf{x}(t))$ este o matrice nesingulară pentru toate valorile lui $\mathbf{x}(t)$.

Această structură este potrivită pentru modele mecanice a căror ecuații conțin neliniarități în membrul stâng, [56]. Reprezentarea prin descriptori poate conduce la reducerea semnificativă a numărului de funcții de apartenență implicate în modelul TS, micșorând astfel efortul de calcul rezultat din numărul de condiții LMI impuse pentru analiză și proiectarea reguletoarelor.

Utilizarea funcțiilor Lyapunov conduce doar la condiții suficiente în cadrul analizei TS, astfel, în ultimele decenii s-au depus eforturi pentru a depăși această sursă de condiții conservative. S-au încercat diferite tipuri de funcții Lyapunov: pătratice pe porțiuni, de tip fuzzy [31], [24], etc. Toate aceste abordări au fost combinate cu diferite moduri de a obține expresii de tipul inegalităților liniar-matriciale (LMI) pure. Alegerea funcțiilor Lyapunov și a tipului de relaxare au fost utilizate pentru modele TS sub forma descriptorilor pentru a obține rezultate din ce în ce mai generale [57], [58].

În studii recente, pentru a obține condiții relaxate în forma inegalităților liniar-matriciale dependente de parametri, s-a utilizat lema lui Finsler și s-au obținut generalizări importante chiar și pentru cadrul de analiză care utilizează funcții pătratice.

Pentru sisteme descrise prin modele descriptor, în forma fuzzy-TS, rezultatele obținute în cadrul acestui proiect, se referă în special la următoarele aspecte:

- S-a propus un mod de a depăși rezultatele existente referitoare la stabilizarea modelelor de tip descriptor TS cu ajutorul lemei lui Finsler care decuplează legea

de control, respectiv de estimare, de funcția Lyapunov, obținându-se astfel o mai mare flexibilitate în proiectare.

- S-a abordat problema proiectării estimatoarelor pentru sisteme continue neliniare în forma descriptor pe baza modelelor Takagi-Sugeno. S-a utilizat un vector de estimare extins pentru a menține structura de descriptor a estimatorului. Condițiile de proiectare a acestui **nou tip de observer** sunt exprimate ca inegalități liniar matriciale, LMI. Structura estimatorului propus, prin folosirea unei variabile intermediară ca variabilă estimată generalizează rezultatele de estimare anterior obținute în literatura de specialitate pentru descriptori TS. Mai mult, printr-o extensie directă prin intermediul lemei lui Finsler, se obțin condiții de proiectare relaxate. Numeroase exemple numerice au arătat eficiența abordării.
- Pentru sisteme nelinare discrete în forma descriptor s-a dezvoltat o nouă abordare în proiectarea estimatoarelor pe baza reprezentării TS și a lemei lui Finsler, care decuplează legea de estimare de funcția Lyapunov, permite structuri mai generale ale observerului și în consecință mai multe grade de libertate în variabilele de decizie din restricțiile LMI, în același timp menținându-se constant numărul de condiții LMI. Abordarea propusă poate fi aplicată și dacă matricea de ieșire a sistemului este neliniară, rezultat care depășește studiile anterioare din acest domeniu.
- S-au obținut condiții pentru stabilizarea sistemelor neliniare discrete în forma descriptor, reprezentate prin modele fuzzy-TS. Pe baza funcțiilor Lyapunov ne-pătratice s-au obținut două abordări în proiectare, iar rezultatele sunt exprimate în termenii inegalităților liniar-matriciale. Ambele abordări au fost validate prin exemple numerice.
- Pentru sisteme neliniare discrete în forma descriptor s-a dezvoltat un cadru sistematic pentru sinteza reguletoarelor. Proiectarea se bazează pe două funcții Lyapunov ne-pătratice și pe utilizarea întârzierilor, similar cu rezultatele prezentate în [50]. Ideea principală este de a introduce întârzieri în funcțiile de apartenență a funcției Lyapunov, astfel obținându-se structuri ale reguletoarelor care includ informații din eșantioanele anterioare. Abordarea exploatează natura discretă a problemei, dar din punctul de vedere al restricțiilor LMI, aduce rezultate relaxate prin creșterea numărului de variabile de decizie în timp ce numărul de LMI rămâne constant. În plus, acest studiu conține o analiză sistematică asupra alegerii eșantioanelor anterioare incluse în funcțiile de

apartenență ale regulatorului și funcției Lyapunov, generalizând astfel rezultatele existente în literatură.

- S-au obținut condiții pentru controlul H_∞ pentru sisteme neliniare discrete în forma descriptor, sub forma inegalităților liniar matriciale. Prin utilizarea funcțiilor Lyapunov cu întârziere și a legilor de control cu întârziere s-au obținut condiții relaxate. Abordarea propusă permite adăugarea unor variabile de decizie suplimentare fără creșterea condițiilor LMI. Eficiența teoriei dezvoltate a fost verificată prin diverse exemple numerice.

2.2.4 Articole rezultate

Articole în reviste internaționale

1. **Zs. Lendek**, J. Lauber and T. M. Guerra, „Periodic Lyapunov functions for periodic TS systems”, *Systems & Control Letters*, Vol. 62, pag. 303–310, 2013.
2. **Zs. Lendek**, T.M. Guerra, J. Lauber, "Controller Design for TS Models Using Delayed Nonquadratic Lyapunov Functions," acceptată pentru publicare la *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014
3. V. Estrada-Manzo, T.M. Guerra, **Zs. Lendek**, Ph. Pudlo, “Controller design for discrete-time descriptor models: a systematic LMI approach”, acceptată pentru publicare la *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014.
4. T. M. Guerra, V. Estrada-Manzo, **Zs. Lendek**, “Observer design for Takagi-Sugeno descriptor models: an LMI approach”, acceptată pentru publicare la *Automatica*, 2014.

Articole în conferințe internaționale

5. **Zs. Lendek**, J. Lauber and T. M. Guerra, "Switching Lyapunov functions for periodic TS systems", in *Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control*, Wurzburg, Germany, 2012
6. **Zs. Lendek**, J. Lauber and T. M. Guerra, "Switching fuzzy observers for periodic TS systems", in *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj, Romania, 2012
7. **Zs. Lendek**, T. M. Guerra and J. Lauber, "Construction of extended Lyapunov functions and control laws for discrete-time TS systems", in *Proceedings of the*

2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Brisbane, Australia, 2012

8. **Zs. Lendek**, J. Lauber, T. M. Guerra, **P. Raica**, “On stabilization of discrete-time periodic TS systems”. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pag. 1-7, Hyderabad, India, July 2013.
9. V. Estrada-Manzo, T. M. Guerra, **Zs. Lendek**, M. Bernal, “Improvements on non-quadratic stabilization of continuous-time Takagi-Sugeno descriptor models”. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pag. 1-6, Hyderabad, India, July 2013.
10. V. Estrada-Manzo, **Zs. Lendek**, and T. M. Guerra, “ Discrete-time Takagi-Sugeno descriptor models: observer design”, *Proceedings of the 19th World Congress, the International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, August 24-29*, pag. 7965- 7969, 2014.
11. **Zs. Lendek**, **P. Raica**, J. Lauber, T.M. Guerra, “Observer Design for Switching Nonlinear Systems”, *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, July 6-11, Beijing, China, pag. 2282 – 2287.
12. V. Estrada-Manzo, T.M. Guerra, **Zs. Lendek**, “An LMI approach for observer design for Takagi- Sugeno descriptor models”, *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 22-24 May, Cluj-Napoca, Romania, 2014
13. V. Estrada-Manzo, T.M. Guerra, **Zs. Lendek**, Ph. Pudlo, “Discrete-time Takagi-Sugeno descriptor models: controller design”, *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, July 6-11, Beijing, China, pag. 2277-2281, 2014
14. V. Estrada-Manzo, **Zs. Lendek**, T. M. Guerra, “Output feedback control for T-S discrete-time nonlinear descriptor models”, acceptat pentru publicare la *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Los Angeles, CA, USA, December 2014.
15. V. Estrada-Manzo, **Zs. Lendek**, T. M. Guerra, “ H_∞ control for discrete-time Takagi-Sugeno descriptor models: a delayed approach”, acceptat pentru publicare la *23e Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications*, Ajaccio, France, October 2014
16. V. Estrada-Manzo, T.M. Guerra, **Zs. Lendek**, Ph. Pudlo, “Discrete time TS descriptor models: observer design via new Lyapunov functions”, trimis spre

publicare la *IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control (CESCIT 2015)*, Maribor, Slovenia, 22-24 Iunie 2015.

Carte publicată

17. Zsofia Lendek, *Nonlinear control using TS models - an introduction*, UTPress, 2013, ISBN 978-973-662-880-1.

Capitol în carte

18. Zs. Lendek, P. Raica, J. Lauber and T.-M. Guerra, "Observer Design for Discrete-Time Switching Nonlinear Models," in *Hybrid Dynamical Systems. Control and Observation*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 457, pag. 27-58, Springer International Publishing, 2015.

2.3 Testare și validare

O parte dintre metodele dezvoltate teoretic au fost implementate și testate în simulare sau pe aplicații de laborator din domenii diverse, după cum urmează:

2.3.1 Braț de robot cu două grade de libertate

În această aplicație, s-a considerat un braț de robot cu 2 grade de libertate (Figura 2) care operează în plan orizontal, pentru care s-a obținut un model fuzzy TS. Incertitudinea care apare la coeficienții de amortizare în fiecare articulație a fost reprezentată ca incertitudine în matricile de stare și s-a utilizat un observer adaptiv TS pentru estimarea acesteia. Toate stările sunt măsurate și de aceea observerul adaptiv a estimat numai incertitudinile.

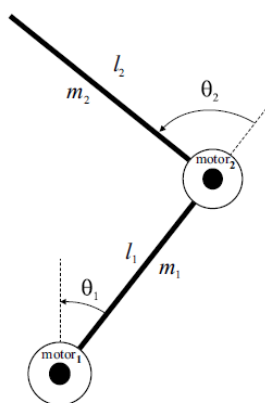


Figura 2. Braț de robot cu două grade de libertate

S-a analizat influența incertitudinilor estimate asupra regulatorului. Acestea sunt utilizate pentru a actualiza modelul TS al brațului de robot. Ca urmare, modelul actualizat a fost utilizat pentru a re-proiecta un regulator care să stabilizeze sistemul. S-au analizat îmbunătățirile performanței regulatorului datorate modelului actualizat. Pentru a utiliza modelul actualizat, a fost necesară o metodă de proiectare care să utilizeze aceeași structură de distribuție a incertitudinilor ca și a observerului adaptiv și anume o abordare robustă de proiectare a regulatorului. S-a analizat de asemenea și estimarea incertitudinilor în prezența unui regulator care stabilizează sistemul.

2.3.2 Modelare fuzzy și control pentru infecția cu virusul HIV

Numeroase cercetări din domeniul interdisciplinar al bioingineriei s-au concentrat în ultimii ani pe modelarea matematică a infecției cu virusul imunodeficienței umane (HIV), abordare care ușurează analiza evoluției virusului în corpul uman. Wodarz și Nowak [59] au dezvoltat un model matematic pentru dinamica virusului HIV și l-au utilizat pentru a observa evoluția infecției pentru un tratament specific. Unele rezultate existente curent se bazează pe un model liniarizat care, însă, nu este precis datorită liniarizării și simplificărilor. În această aplicație s-a considerat modelul neliniar nesimplificat propus în [59] pentru care am dezvoltat o reprezentare fuzzy exactă cu scopul de a ușura analiza și proiectarea legilor de control. S-a obținut un regulator care stabilizează sistemul neliniar. Mai mult, s-au inclus indicatori de performanță în proiectarea legilor de control echivalente tratamentului medical.

2.3.3 Proiectarea unui estimator și a regulatorului pentru o macara (3D crane)

Sistemele de control automat pentru macarale pot asista operatorul în manevrele de transport a încărcăturilor grele dintr-o poziție în alta.



În această aplicație a fost proiectat un estimator de stare fuzzy discret și un regulator pentru un proces de laborator de tip macara (3D Crane), produs de Inteco, [60], prezentat în Figura 3. Observerul proiectat a estimat în mod corect stările, cu o eroare de 10^{-3} comparativ cu sistemul fizic. Regulatorul fuzzy proiectat pentru acest sistem a fost testat atât în simulare, cât și pe aplicația reală de laborator.

Figura 3. Inteco 3D Crane

2.3.4 Estimarea parametrilor și stărilor unor sisteme electromecanice neliniare

Cercetările recente prezintă diferite metode pentru estimarea sarcinii necunoscute a sistemelor mecatronice sau a manipuloarelor robotice. În [61], [62] sunt abordate sisteme bazate pe rețele neuronale și fuzzy antrenate offline. Estimatoarele pentru sarcina au un număr mare de parametri care sunt antrenați utilizând poziția măsurată, viteza și informația cunoscută despre sarcină. Pentru a implementa aceste abordări într-o aplicație de timp real este nevoie de informație corectă asupra poziției și vitezei, care

nu pot fi măsurate pentru toate sistemele. În [63], este propus un sistem adaptiv bazat pe minimizarea erorii de predicție care estimează online sarcina unui servo-sistem, dar utilizează viteza măsurată pentru estimarea online. În [64] un model sub forma unei rețele neuronale este antrenat cu un set de date mare și un filtru Kalman este utilizat pentru estimarea online a sarcinii. Sarcina estimată este utilizată pentru îmbunătățirea performanțelor de control ale manipulatorului.

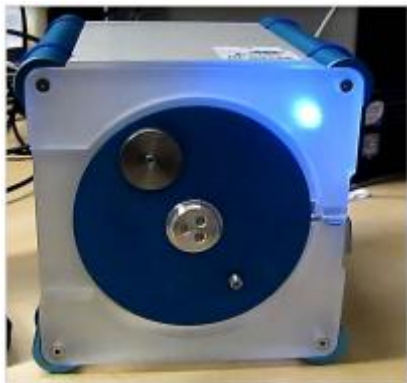


Figura 4. Servo-sistem neliniar. Aplicație de laborator

În aceste aplicații s-au dezvoltat un estimator pentru viteza și o sarcină necunoscută și variabilă, pentru un servo-sistem neliniar (Figura 4), respectiv un estimator de viteză pentru un quadrotor, utilizând un filtru Kalman extins și un estimator fuzzy Takagi-Sugeno.

Pentru modelarea sistemului neliniar studiat s-a utilizat metoda neliniarității de sector, iar estimatorul obținut este neliniar. Pentru proiectarea acestuia s-a impus o viteză de convergență dorită.

Filtrul Kalman extins utilizează dinamica liniarizată pentru estimare. Pe baza experimentelor, valorile inițiale ale stărilor și matricei de covarianță a erorii afectează performanța filtrului Kalman extins. Dacă inițializarea stărilor sau a parametrilor nu este făcută cu acuratețe, sau dacă există dinamică puternic neliniară, există o divergență în estimarea stărilor și parametrilor. Pe de altă parte, estimatorul fuzzy a dat rezultate precise pentru orice valoare din regiunea de proiectare și nu a fost dependent de parametri.

Rezultatele de estimare obținute au arătat că informația bazată pe o cunoaștere exactă a sistemului neliniar au dus la o mai bună estimare a stărilor și parametrilor în cazul estimatorului fuzzy, atât în simulare cât și în funcționarea în timp-real.

2.3.5 Aplicații experimentale ale estimatoarelor și reguletoarelor fuzzy TS pentru un sistem electromecanic neliniar

În această aplicație s-a proiectat un estimator și un regulator fuzzy-TS pentru un sistem electromecanic cu 3 grade de libertate, quadrotorul fix, 3DoF de la Quanser (Figura 5). Modelul sistemului, obținut si principiile fizicii, este neliniar și neliniarități apar de asemenea în modelul elicei. Problema abordată în această aplicație este cea a controlului altitudinii corpului rigid, [65]. Sistemul propus poate fi utilizat ca un sistem de *benchmark* pentru tehnici de control neliniar și estimare. Deoarece neliniaritățile din

jurul punctului de echilibru sunt netede, modelarea și controlul se poate realiza utilizând modele neliniare TS.

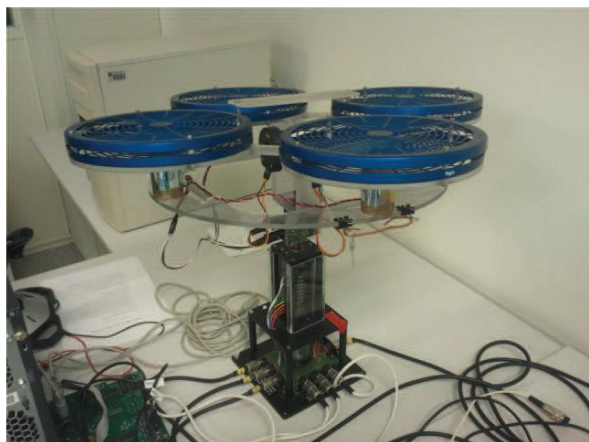


Figura 5. Sistemul quad-rotor 3DoF Quanser©

Estimatorul și regulatorul rezultate au fost testate experimental și performanța a fost comparată cu estimatorul și regulatorul calculate în mod similar pentru sistemul liniarizat, cu aceleași LMI și aceleași criterii de performanță.

Tehnicile de estimare prezentate în [66] și cele de control cu cost garantat din [67] au fost rafinate și adaptate problemei particulare considerate.

Contribuțiile aduse în această aplicație se referă mai întâi la formalizarea LMI în timp discret cu rejectarea perturbațiilor pentru estimatoare cu premize nemăsurabile și propunerea unei îmbunătățiri a metodologiei de obținere a unei limite pentru un termen incert care apare în dinamica erorii. O altă contribuție se referă la explorarea în detaliu a modelului sistemului electromecanic și evaluarea experimentală a posibilelor avantaje a unui regulator robust cu cost garantat în raport cu un regulator liniar.

Rezultatele experimentale au arătat că se poate obține o estimare mai precisă a altitudinii și vitezei de rotație dacă se utilizează un estimator fuzzy-TS când domeniul de operare este departe de punctul de liniarizare, decât în cazul unui estimator clasic liniar. De asemenea, o performanță mai bună s-a obținut dacă s-a utilizat un regulator calculat pe baza unui indice de performanță pătratic.

2.3.6 Articole rezultate

Articole în reviste internaționale

1. S. Beyhan, **Zs. Lendek**, R. Babuska and M. Alci, „Output feedback control based on adaptive TS fuzzy payload estimation”, trimis spre publicare la *Control Engineering Practice*, 2013
2. **Zs. Lendek**, A. Sala, P. Garcia and R. Sanchis, „Experimental application of Takagi-Sugeno observers and controllers in a nonlinear electromechanical system”, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 15, no. 4, pag. 3–14, 2013

Articole în conferințe internaționale

3. S. Bindiganavile Nagesh, **Zs. Lendek**, A. A. Khalate and R. Babuska, "Adaptive fuzzy observer and robust controller for a 2-DOF robot arm," in *Proceedings of the 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Brisbane, Australia, 2012
4. **P. Petrehus, Zs. Lendek, P. Raica**, Fuzzy modeling and control of a 3D crane". In *Proceedings of the 2013 IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Science*, pag. 201-206, Chengdu, China, Septembrie 2013
5. **P. Petrehus, Zs. Lendek**, "Fuzzy modeling and control of HIV infection," in *Student forum - 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj, Romania, 2012.
6. S. Beyhan, **Zs. Lendek**, M. Alci, R. Babuska, "Takagi-Sugeno Fuzzy Observer and Extended Kalman Filter for Adaptive Payload Estimation", In *Asian Control Conference*, pag. 1-6, Istanbul, Turkey, June 2013.

3 Bibliografie

- [1] J. R. Velasco, J. C. González, L. Magdalena și C. A. Iglesias, „Multiagent-based control systems: A hybrid approach to distributed process control,” *Control Engineering Practice*, vol. 4, pp. 839-845, 1996.
- [2] R. Vadigepalli și F. Doyle, „A distributed state estimation and control algorithm for plantwide processes,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, nr. 1, pp. 119-127, 2003.
- [3] R. Vadigepalli și F. J. Doyle, „Structural analysis of large-scale systems for distributed state estimation and control applications,” *Control Engineering Practice*, vol. 11, nr. 8, pp. 895-905, 2003.
- [4] C.-L. Hwang și N.-W. Chang, „Fuzzy Decentralized Sliding-Mode Control of a Car-Like Mobile Robot in Distributed Sensor-Network Spaces,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 16, nr. 1, pp. 97-109, 2008.
- [5] H. Benitez-Perez, „Real-time distributed control: A fuzzy and model predictive control approach for a nonlinear problem,” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 2, nr. 2, pp. 474-490, 2008.
- [6] J. Sasiadek și J. Khe, „Sensor fusion based on fuzzy Kalman filter,” în *Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control*, 2001.
- [7] D. Simon, „Kalman filtering for fuzzy discrete time dynamic systems,” *Applied Soft Computing*, vol. 3, nr. 3, pp. 191-207, 2003.
- [8] S. Arulampalam, S. Maskell, N. J. Gordon și T. Clapp, „A Tutorial on Particle Filters for On-line Nonlinear Non-Gaussian Bayesian Tracking,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, nr. 2, pp. 174-188, 2002.
- [9] M. Saif și Y. Guan, „Decentralized state estimation in large-scale interconnected dynamical systems,” *Automatica*, vol. 28, nr. 1, pp. 215-219, 1992.
- [10] C.-L. Hwang, L.-J. Chang și Y.-S. Yu, „Network-Based Fuzzy Decentralized Sliding-Mode Control for Car-Like Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, nr. 1, pp. 574-585, 2007.

- [11] V. Kariwala, „Fundamental limitation on achievable decentralized performance,” *Automatica*, vol. 43, nr. 10, pp. 1849-1854, 2007.
- [12] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.
- [13] T. Takagi și M. Sugeno, „Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, nr. 1, pp. 116-132, 1985.
- [14] H. Ohtake, K. Tanaka și H. Wang, „Fuzzy modeling via sector nonlinearity concept,” în *Proceedings of the Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, Vancouver, Canada, 2001.
- [15] C. Fantuzzi și R. Rovatti, „On the Approximation Capabilities of the Homogeneous Takagi-Sugeno Model,” în *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, New Orleans, LA, USA, 1996.
- [16] K. Tanaka și H. O. Wang, *Fuzzy Control System Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [17] Zs. Lendek, T.-M. Guerra, R. Babuska și B. De Schutter, *Stability analysis and nonlinear observer design using Takagi-Sugeno fuzzy models*, Springer Germany, 2010.
- [18] W.-J. Wang și W.-W. Lin, „Decentralized PDC for large-scale T-S fuzzy systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 13, nr. 6, pp. 779-786, 2005.
- [19] S. Tong, W. Wang și L. Qu, „Decentralized robust control for uncertain T-S fuzzy large-scale systems with time-delay,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 3, nr. 3, pp. 657-672, 2007.
- [20] C.-S. Tseng, „A Novel Approach to H_∞ Decentralized Fuzzy-Observer-Based Fuzzy Control Design for Nonlinear Interconnected Systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 16, nr. 5, pp. 1337-1350, Oct. 2008.
- [21] K. Tanaka, T. Ikeda și H. Wang, „Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, nr. 2, pp. 250-265, 1998.
- [22] K. Tanaka și H. O. Wang, *Fuzzy Control System Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [23] M. Johansson și A. Rantzer, „Computation of piecewise quadratic Lyapunov

- functions for hybrid systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, nr. 4, pp. 555-559, 1998.
- [24] T. M. Guerra și L. Vermeiren, „LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno's form," *Automatica*, vol. 40, nr. 5, pp. 823-829, 2004.
- [25] G. Feng, „Robust Hinf filtering of fuzzy dynamic systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, nr. 2, pp. 658-670, 2005.
- [26] L. A. Mozelli, R. .. Palhares, F. O. Souza și E. M. A. M. Mendes, „Reducing conservativeness in recent stability conditions of TS fuzzy systems," *Automatica*, vol. 45, nr. 6, pp. 1580-1583, 2009.
- [27] M. Bernal și T. M. Guerra, „Generalized non-quadratic stability of continuous-time Takagi-Sugeno models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 18, nr. 4, pp. 815-822, 2010.
- [28] B. Ding, H. Sun și P. Yang, „Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno's form," *Automatica*, vol. 42, nr. 3, pp. 503-508, 2006.
- [29] J. Dong și G. Yang, „Dynamic output feedback Hinf control synthesis for discrete-time T-S fuzzy systems via switching fuzzy controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 160, nr. 19, pp. 482-499, 2009.
- [30] D. H. Lee, J. B. Park și Y. H. Joo, „Approaches to extended non-quadratic stability and stabilization conditions for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems," *Automatica*, vol. 47, nr. 3, pp. 534-538, 2011.
- [31] K. Tanaka, T. Hori și H. Wang, „A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, nr. 4, pp. 582-589, 2003.
- [32] B. Rhee și S. Won, „A new fuzzy Lyapunov function approach for a Takagi-Sugeno fuzzy control system design," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 157, nr. 9, pp. 1211-1228, 2006.
- [33] T. M. Guerra și M. Bernal, „A way to escape from the quadratic framework," în *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Jeju, Korea, 2009.

- [34] M. Bernal, T. M. Guerra și A. Kruszewski, „A membership-function-dependent approach for stability analysis and controller synthesis of Takagi-Sugeno models,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 160, nr. 19, pp. 2776-2795, 2009.
- [35] P. Krishnamurthy și F. Khorrami, „Decentralized control and disturbance attenuation for large-scale nonlinear systems in generalized output-feedback canonical form,” *Automatica*, vol. 39, nr. 11, pp. 1923-1933, 2003.
- [36] S.-J. Liu, J.-F. Zhang și Z.-P. Jiang, „Decentralized adaptive output-feedback stabilization for large-scale stochastic nonlinear systems,” *Automatica*, vol. 43, nr. 2, pp. 238-251, 2007.
- [37] G. Haijun, Z. Tianping și S. Qikun, „Decentralized model reference adaptive sliding mode control based on fuzzy model,” *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 17, nr. 1, pp. 182-186, 2006.
- [38] Y. Bavafa-Toosi, H. Ohmori și B. Labibi, „A generic approach to the design of decentralized linear output-feedback controllers,” *Systems & Control Letters*, vol. 55, nr. 4, pp. 282-292, 2006.
- [39] H. Zhang, C. Li și X. Liao, „Stability analysis and Hinf controller design of fuzzy large-scale systems based on piecewise Lyapunov functions,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, vol. 36, nr. 3, pp. 685-698, 2006.
- [40] X. Liu și H. Zhang, „Stability analysis of uncertain fuzzy large-scale system,” *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 25, nr. 5, pp. 1107-1122, 2005.
- [41] M. Akar și U. Ozguner, „Decentralized parallel distributed compensator design for Takagi-Sugeno fuzzy systems,” în *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, 1999., Phoenix, AZ, USA, 1999.
- [42] D. Xu, Y. Li și T. Wu, „Stability analysis of large-scale nonlinear systems with hybrid models,” în *Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006.
- [43] W.-J. Wang și W.-W. Lin, „Decentralized PDC for large-scale T-S fuzzy systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 13, nr. 6, pp. 779-786, 2005.
- [44] J. Daafouz, P. Riedinger și C. Iung, „Stability analysis and control synthesis for switched systems: a switched Lyapunov function approach,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, nr. 11, pp. 1883-1887, 2002.

- [45] K. Tanaka, M. Iwasaki și H. Wang, „Switching control of an R/C hovercraft: stabilization and smooth switching,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, vol. 31, nr. 6, pp. 853-863, 2001 .
- [46] H. Lam, F. Leung și P. Tam, „A switching controller for uncertain nonlinear systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, nr. 1, pp. 1-14, 2002.
- [47] G. Feng, „Controller synthesis of fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, nr. 5, pp. 605-612, 2003.
- [48] G. Feng, „Hinf controller design of fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 34, nr. 1, pp. 283-292, 2004.
- [49] H. Kerkeni, T. Guerra și J. Lauber, „Controller and observer design for discrete TS models using an efficient Lyapunov function,” în *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, Barcelona, Spain, 2010.
- [50] T. M. Guerra, H. Kerkeni, J. Lauber și L. Vermeiren, „An efficient Lyapunov function for discrete TS models: Observer design,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 20, nr. 1, pp. 187-192, 2012.
- [51] A. Kruszewski, R. Wang și T. M. Guerra, „Nonquadratic stabilization conditions for a class of uncertain nonlinear discrete time TS fuzzy models: A new approach,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, nr. 2, pp. 606-611, 2008.
- [52] G. Feng, „Stability analysis of discrete-time fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, nr. 1, pp. 22-28, 2004.
- [53] J. Doo, S. Seung și P. PooGyeon, „Output-feedback control of discrete-time switching fuzzy system,” în *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, St. Luis, MO, USA, 2003.
- [54] T. Taniguchi, K. Tanaka și H. O. Wang, „Fuzzy descriptor systems and fuzzy controller designs,” în *Proceedings of the Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress*, 1999.
- [55] T. Taniguchi, K. Tanaka, K. Yamafuji și H. O. Wang, „Fuzzy descriptor systems: stability analysis and design via LMIs,” în *Proceedings of the American Control Conference*, 1999.

- [56] D. Luenberger, „Dynamic equations in descriptor form,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, nr. 3, p. 312–321, 1977.
- [57] T. M. Guerra, M. Bernal, A. Kruszewski și M. Afroun, „A way to improve results for the stabilization of continuous-time fuzzy descriptor models,” în *46th IEEE Conference on Decision and Control*, 2007.
- [58] K. Guelton, S. Delprat și T. M. Guerra, „An alternative to inverse dynamics joint torques estimation in human stance based on a Takagi– Sugeno unknown-inputs observer in the,” *Control Engineering Practice*, vol. 16, nr. 12, p. 1414–1426, 2008.
- [59] D. Nowak și M. Wodarz, „Specific therapy regimes could lead to long-term immunological control of HIV,” în *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999.
- [60] ***, *3D Crane User Manual*, INTECO.
- [61] M. Leahy, M. Johnson și S. Rogers, „Neural network payload estimation for adaptive robot control,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 2, nr. 1, pp. 93-100, 1991.
- [62] H. C. Nho și P. Meckl, „Intelligent feedforward control and payload estimation for a two-link robotic manipulator,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, nr. 2, p. 277–283, 2003.
- [63] S. Abiko și K. Yoshida, „On-line parameter identification of a payload handled by flexible based manipulator,” în *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004.
- [64] M. Savia și H. Koivo, „Neural-network-based payload determination of a moving loader,” *Control Engineering Practice*, vol. 12, nr. 5, p. 555–561, 2004.
- [65] E. Marcu, „Fuzzy logic approach in real-time UAV,” *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 13, nr. 1, pp. 12-17, 2011.
- [66] Zs. Lendek, R. Babuska și B. De Schutter, „Fuzzy models and observers for freeway traffic state tracking,” în *Proceedings of the American Control Conference*, Baltimore, MD, USA, 2010.
- [67] H. Wu și K. Cai, „H2 guaranteed cost fuzzy control design for discrete-time nonlinear systems with parameter uncertainty,” *Automatica*, vol. 42, nr. 7, pp. 1183-1188, 2006.