

Raport științific

privind implementarea proiectului TE 74/2011 în perioada ianuarie – decembrie 2012

I. Obiectivele și activitățile etapei

Activitățile desfășurate în această etapă 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 ne-pătratice.
3. Testare și validare: testare pe exemple academice, determinarea stadiului actual al aplicațiilor, testarea pe aplicații reale. Obiectivul acestei direcții 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.

II. Modelarea și analiza sistemelor interconectate structurate

Pentru analiza și proiectarea sistemelor TS [1], se utilizează metoda directă Lyapunov, cu funcții pătratice [2], [3] pătratice pe porțiuni [4], sau, mai recent, ne-pătratice [5], [6], [7], [8]. 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 [5], [9], [10], [11], acestea au fost utilizate de asemenea și pentru modele TS continue [12], [13], [14], [7]. Pentru a reduce conservativitatea condițiilor, s-au introdus proprietăți ale funcțiilor de apartenență [15] și metode de reducere a complexității LMI-urilor.

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 [16], [17], [18], [19], [20], [21].

Analiza stabilității sistemelor TS distribuite se bazează în principal pe existența unei funcții Lyapunov comune pentru fiecare subsistem [22], [23]. 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 [22] și relaxat în [24]. 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 [23]. Pentru sisteme distribuite TS cu consecvenți afini, dar termeni de interconexiune liniari între subsisteme, a fost dezvoltată o abordare bazată pe funcții Lyapunov pătratice pe porțiuni în [20]. Analiza stabilității sistemelor TS distribuite cu incertitudini a fost investigată în [21].

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.

În cadrul acestui proiect într-o primă etapă 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).

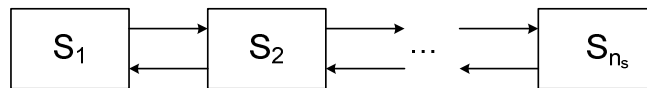


Figura 1. Subsisteme conectate în serie

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

$$\begin{aligned} \dot{x}_l &= \sum_{i=1}^{m_l} w_i^l(z_l) (A_i^l x_l + A_i^{l,l-1} x_{l-1} + A_i^{l,l+1} x_{l+1} + B_i^l u_l) \\ y_l &= \sum_{i=1}^{m_l} w_i^l(z_l) C_i^l x_l \end{aligned}$$

pentru $l = 1, 2, \dots, n_s$.

Această abordare a fost extinsă pentru proiectarea estimatoarelor de stare și a legilor de control. Exploatând structura sistemului au fost obținute condiții mai puțin conservative decât cele existente în literatură. Mai mult, pentru dezvoltarea lor, s-au utilizat funcții Lyapunov ne-pătratice, folosite pentru prima dată pentru analiza și proiectarea sistemelor distribuite TS continue. S-au obținut condiții suficiente pentru stabilitate, pentru proiectarea estimatoarelor și legilor de control, care au fost verificate pe numeroase exemple numerice.

Cercetările viitoare vor extinde rezultatele obținute pentru sisteme conectate în serie la sisteme mai generale, interconectate. Alte cazuri speciale care vor fi investigate sunt sistemele distribuite cu conexiuni simetrice sau sisteme distribuite omogene.

Articol rezultat:

1. **Zs. Lendek, P. Raica, B. De Schutter, R. Babuska**, „Analysis and design for continuous-time string-connected TS systems”, trimis spre publicare la *Journal of Franklin Institute*.

III. Proiectarea estimatoarelor pentru sisteme distribuite structurate

Pentru sisteme TS discrete, funcțiile Lyapunov ne-pătratică au dus la o reală îmbunătățire în condițiile de proiectare [8, 11-13]. S-a arătat că soluțiile obținute cu funcții Lyapunov ne-pătratică includ și extind setul de soluții obținute în cadrul pătratic. Funcțiile ne-pătratică au fost extinse la funcții Lyapunov cu sumă dublă în [11] și mai târziu la funcții Lyapunov polinomiale în [14-16]. Un tip diferit de îmbunătățire în cazul discret a fost dezvoltat în [9], 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*). În general metodele de proiectare pentru estimatoare conduc de asemenea la o problemă de fezabilitate a inegalităților liniar matriciale (LMI).

Pentru proiectarea estimatoarelor și a legilor de control pentru modele TS discrete, în [17] s-a utilizat un regulator cu întârziere ne-pătratică cu sumă dublă. Această metodă a fost generalizată pentru proiectarea estimatoarelor în [18] 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.

În cadrul cercetărilor curente a fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu întârziere care conduce la condiții de proiectare mai relaxate și la costuri de calcul reduse.

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 [17-20]. 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 pătratică [21-24] sau pătratică pe porțiuni [25,26]. Deși există rezultate pentru sisteme discrete liniare cu comutație [27], pentru sisteme TS discrete există doar un număr mic de rezultate [28, 29].

În acest context a fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu comutație pentru analiza stabilității modelelor TS periodice. Această funcție este utilă pentru demonstrarea stabilității sistemelor TS periodice cu modele locale instabile și chiar cu subsisteme instabile.

S-a analizat stabilitatea și condițiile de proiectare ale estimatoarelor și a reguletoarelor pentru sisteme discrete TS. Pentru a obține condițiile a fost propusă o funcție Lyapunov ne-pătratică cu comutație. În general, analiza stabilității modelelor TS se bazează pe stabilitatea fiecărui model local, iar pentru proiectarea reguletoarelor este necesar ca fiecare model local să fie controlabil. Utilizând condițiile determinate cu funcția Lyapunov propusă în acest proiect, au fost dezvoltate legi de control pentru sisteme cu comutație în cazul în care modelele locale ale subsistemelor nu sunt stabile respectiv stabilizabile.

Pentru a estima stările unui sistem TS periodic a fost dezvoltat un observer cu comutație. Pentru obținerea condițiilor de proiectare s-a utilizat o funcție Lyapunov ne-pătratică periodică cu variație pe mai multe eșantioane. Astfel a fost dezvoltată o metodă pentru proiectarea estimatoarelor pentru sisteme TS periodice cu modele locale ne-observabile.

Articole rezultate:

1. **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
2. **Zs. Lendek**, J. Lauber and T. M. Guerra, „Periodic Lyapunov functions for periodic TS systems”, trimis spre publicare la *Systems and Control Letters*, 2012
3. **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
4. **Zs. Lendek**, J. Lauber and T. M. Guerra, „Controller design for TS models using non-quadratic Lyapunov functions”, trimis spre publicare la *Automatica*, 2012
5. **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

IV. 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:

a) 2-DOF robot arm

În această aplicație, s-a considerat un braț de robot cu 2 grade de libertate 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. După estimarea incertitudinilor și obținerea modelului mai precis decât cel original,

s-a analizat influența incertitudinilor estimate asupra regulatorului. Ca urmare, modelul actualizat a fost utilizat pentru reproiectarea regulatorului. 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.

b) Modelare și control TS pentru infecția cu 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 [25] au dezvoltat un model matematic pentru dinamica virusului HIV și l-au utilizat pentru a observa evoluția infecției pentru un tratament specific. Rezultatele existente se bazează pe un model liniarizat care, datorită simplificărilor, nu este precis. În această aplicație s-a considerat modelul neliniar nesimplificat propus în [25] pentru care am dezvoltat o reprezentare TS exactă. Pe baza acestui model a fost proiectat un observer care estimează stările modelului neliniar, facilitând astfel analiza infecției.

c) 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 și un regulator pentru un proces de laborator de tip macara (3D Crane), produs de Inteco, [26]. Observerul proiectat a estimat corect stările sistemului fizic, cu o eroare de 10^{-3} . Regulatorul fuzzy proiectat pentru acest sistem a fost testat în simulare, urmând ca în etapele următoare să fie implementat pe aplicația reală de laborator.

Articole rezultate:

1. 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
2. **P. Petrehus, Zs. Lendek, P. Raica**, „Fuzzy modeling and control of a 3D crane”, trimis spre publicare la *American Control Conference 2013*.
3. **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.

Director proiect,
Șl.dr.ing. Zsófia Lendek



Bibliografie

- [1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [2] K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, 1998.
- [3] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control System Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [4] M. Johansson and A. Rantzer, "Computation of piecewise quadratic Lyapunov functions for hybrid systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 4, pp. 555-559, 1998.
- [5] T. M. Guerra and L. Vermeiren, "LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno's form," *Automatica*, vol. 40, no. 5, pp. 823-829, 2004.
- [6] G. Feng, "Robust Hinf filtering of fuzzy dynamic systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 2, pp. 658-670, 2005.
- [7] L. A. Mozelli, R. Palhares, F. O. Souza and E. M. A. M. Mendes, "Reducing conservativeness in recent stability conditions of TS fuzzy systems," *Automatica*, vol. 45, no. 6, pp. 1580-1583, 2009.
- [8] M. Bernal and T. M. Guerra, "Generalized non-quadratic stability of continuous-time Takagi-Sugeno models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 815-822, 2010.
- [9] B. Ding, H. Sun and P. Yang, "Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno's form," *Automatica*, vol. 42, no. 3, pp. 503-508, 2006.
- [10] J. Dong and 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, no. 19, pp. 482-499, 2009.
- [11] D. H. Lee, J. B. Park and Y. H. Joo, "Approaches to extended non-quadratic stability and stabilization conditions for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems," *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 534-538, 2011.
- [12] K. Tanaka, T. Hori and H. Wang, "A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 582-589, 2003.
- [13] B. Rhee and S. Won, "A new fuzzy Lyapunov function approach for a Takagi-Sugeno fuzzy control system design," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 157, no. 9, pp. 1211-1228, 2006.
- [14] T. M. Guerra and M. Bernal, "A way to escape from the quadratic framework," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Jeju, Korea, 2009.
- [15] M. Bernal, T. M. Guerra and A. Kruszewski, "A membership-function-dependent approach for stability analysis and controller synthesis of Takagi-Sugeno models," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 160, no. 19, pp. 2776-2795, 2009.

- [16] P. Krishnamurthy and F. Khorrami, "Decentralized control and disturbance attenuation for large-scale nonlinear systems in generalized output-feedback canonical form," *Automatica*, vol. 39, no. 11, pp. 1923-1933, 2003.
- [17] S.-J. Liu, J.-F. Zhang and Z.-P. Jiang, "Decentralized adaptive output-feedback stabilization for large-scale stochastic nonlinear systems," *Automatica*, vol. 43, no. 2, pp. 238-251, 2007.
- [18] G. Haijun, Z. Tianping and S. Qikun, "Decentralized model reference adaptive sliding mode control based on fuzzy model," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 182-186, 2006.
- [19] Y. Bavafa-Toosi, H. Ohmori and B. Labibi, "A generic approach to the design of decentralized linear output-feedback controllers," *Systems & Control Letters*, vol. 55, no. 4, pp. 282-292, 2006.
- [20] H. Zhang, C. Li and 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, no. 3, pp. 685-698, 2006.
- [21] X. Liu and H. Zhang, "Stability analysis of uncertain fuzzy large-scale system," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 25, no. 5, pp. 1107-1122, 2005.
- [22] M. Akar and U. Ozguner, "Decentralized parallel distributed compensator design for Takagi-Sugeno fuzzy systems," in *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, 1999., Phoenix, AZ, USA, 1999.
- [23] D. Xu, Y. Li and T. Wu, "Stability analysis of large-scale nonlinear systems with hybrid models," in *Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006.
- [24] W.-J. Wang and W.-W. Lin, "Decentralized PDC for large-scale T-S fuzzy systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 779-786, 2005.
- [25] D. Nowak and M. Wodarz, "Specific therapy regimes could lead to long-term immunological control of HIV," in *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999.
- [26] ***, *3D Crane User Manual*, INTECO.