

## Tehnici de tip model-free de acordare a parametrilor reguletoarelor automate

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Ingineria Sistemelor

autor **ing. Raul-Cristian ROMAN**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Radu-Emil PRECUP

luna ianuarie anul 2018

Tema de doctorat intitulată „**Tehnici de tip model-free de acordare a parametrilor reguletoarelor automate**” este orientată pe implementarea și îmbunătățirea algoritmilor de tip model-free control exemplificați prin Model-Free Adaptive Control (MFAC) și Model-Free Control (MFC) pe sistemului aerodinamic cu două rotoare (twin rotor aerodynamic system, TRAS). Teza este structurată în cinci capitole după cum urmează.

În **capitolul 1** este prezentată tematica abordată împreună cu motivația cercetării. Apoi sunt prezentate principalele obiective ale tezei după cum urmează:

- Obiectivul principal al acestei teze îl constituie determinarea automată a parametrilor algoritmilor de reglare de tip model-free. Acest obiectiv a apărut în contextul momentului inițial al studiului bibliografic (toamna anului 2014), când era pusă problema alegerii celor mai bune valori ale parametrilor reguletoarelor inițiale deoarece aceste valori erau determinate în manieră euristică atât în cazul MFC cât și în cazul MFAC.
- Cel de-al doilea obiectiv al tezei îl constituie validarea experimentală a tehnicilor de tip model-free de acordare a parametrilor reguletoarelor automate. După cunoștințele autorului validările experimentale prezentate în cele ce urmează reprezintă primele aplicații pe plan mondial ale algoritmilor MFC și MFAC pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.

În finalul primului capitol este oferită o scurtă prezentare generală a tezei și este descris echipamentul de tip sistem aerodinamic cu două rotoare, un echipament cu două grade de libertate cu două intrări și două ieșiri în care mișcarea pe verticală a TRAS induce perturbații mișcării pe orizontală în timp ce cuplarea de la azimut la relevment induce perturbații neglijabile. Pe acest echipament au fost realizate toate validările experimentale prezentate în capitolele 2, 3 și 4.

În cadrul **capitolului 2** este prezentată pentru început o scurtă descriere generală a tehnicii Model-Free Control (MFC). Este efectuat apoi un studiu bibliografic care evidențiază în final principalele avantaje și dezavantaje ale algoritmului, pregătind următoarele patru subcapitole în care algoritmi MFC sunt prezentați în detaliu și apoi validați experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare. Urmează trei subcapitole dedicate tehnicilor MFC în variante hibride:

- Prima tehnică hibridă propusă este obținută prin combinarea tehnicii Model-Free Control cu regulatorul liniar-pătratic (Linear Quadratic Regulator, LQR) și abreviată MFC-LQR. Sunt urmărite trei scopuri:

1. acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor MFC (care, după caz, pot fi foarte mulți),
  2. aprecierea sistematică a performanțelor obținute de sistemele de reglare automată (SRA) cu reguletoare MFC și
  3. asigurarea stabilității SRA prin impunerea unor restricții de stabilitate, dar utilizând modele matematice ale procesului condus. Tehnica hibridă MFC-LQR este validată experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.
- Cea de-a doua tehnică hibridă, Model-Free Control-Virtual Reference Feedback Tuning (MFC-VRFT), este propusă pentru realizarea a două scopuri:
    1. Acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor MFC și
    2. Asigurarea stabilității SRA. Noua tehnică hibridă MFC-VRFT este validată prin simulare numerică utilizând modelul matematic detaliat al sistemului aerodinamic cu două rotoare.
  - În cadrul celei de-a treia tehnici hibride, denumită Model-Free Control-reglare în regim alunecător (sliding mode control, SMC) (Model-Free Sliding Mode Control, MFSSMC), sunt propuse două abordări formulate sub forma a două tehnici rezultate din combinarea algoritmului Model-Free Control cu Sliding Mode Control, și anume MFSSMC1 și MFSSMC2. Combinarea tehnicilor data-driven și SMC a apărut datorită unor aplicații care necesită SRA cu performanțe de reglare superioare, iar algoritmi de reglare specifici acestor tehnici au fost dezvoltati pe baza teoriei stabilității în sens Lyapunov. Noile tehnici hibride MFSSMC1 și MFSSMC2 sunt validate experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.

În finalul capitolului 2 sunt prezentate concluziile și contribuțiile propuse aduse tehnicii Model-Free Control.

Rezultatele teoretice din cazul multivariabil (Multi Input-Multi Output, MIMO) propuse în capitolul 2 sunt aplicabile proceselor neliniare la care numărul de intrări (comenzi) este egal cu numărul de ieșiri (reglate).

În prima parte a **capitolului 3** este prezentată o scurtă descriere a tehnicii Model-Free Adaptive Control (MFAC). Aceasta este urmată de un studiu bibliografic pentru a ilustra avantajele și dezavantajele algoritmilor MFAC. Următoarele trei subcapitole sunt dedicate algoritmilor MFAC după cum urmează:

- Algoritmii MFAC în versiunea Compact Form Dynamic Linearization (CFDL) sunt prezenți în detaliu, iar apoi validați experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.
- Algoritmii MFAC în versiunea Partial Form Dynamic Linearization (PFDL) sunt prezenți în detaliu, iar apoi validați experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.
- În subcapitolul următor este introdusă tehnica hibridă Model-Free Adaptive Control-Virtual Reference Feedback Tuning (MFAC-VRFT) pentru soluționarea problemei acordării tuturor parametrilor inițiali ai algoritmului MFAC în lipsa unor pași pentru acordarea sistematică a acestora. Noua tehnică hibridă MFAC-VRFT este validată experimental pe echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare.

În ultimul subcapitol sunt prezentate concluziile și contribuțiile propuse aduse tehnicii Model-Free Adaptive Control.

La fel ca și în capitolul anterior, rezultatele teoretice din cazul MIMO propuse în capitolul curent sunt aplicabile proceselor neliniare la care numărul de intrări (comenzi) este egal cu numărul de ieșiri (reglate).

**Capitolul 4** este dedicat studiului comparativ între cele două tehnici de tip model-free și anume MFC și MFAC, și tehnica Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) pentru a determina care dintre algoritmi model-free implementați în diverse moduri asigură cele mai bune performanțe SRA în reglarea azimutului și relevmentului echipamentului de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare. Sunt propuse trei studii de caz:

- În primul studiu de caz are loc validarea experimentală a algoritmilor MFAC-CFDL dezvoltati sub formă de regulatoare MFAC-CFDL, proiectate MIMO în două moduri:
  1. sub forma unui singur regulator MIMO MFAC-CFDL, utilizând abrevierea MFAC-MIMO și
  2. sub formă de două regulatoare monovariabile (Single Input-Single Output, SISO) MFAC-CFDL ce rulează în paralel, utilizând abrevierea CFDL-2SISO.
- În al doilea studiu de caz sunt validate experimental opt variante de SRA cu regulatoare utilizând algoritmi MFAC-CFDL, MFC și VRFT în diverse combinații, fără aplicarea perturbațiilor, după cum urmează:
  1. algoritmul MFC MIMO este implementat sub forma unui singur regulator MIMO, utilizând abrevierea MFC-MIMO,
  2. algoritmul MFC este implementat sub forma a două regulatoare SISO ce rulează în paralel, utilizând abrevierea MFC-2SISO,
  3. algoritmul MFAC-CFDL MIMO este implementat sub forma unui singur regulator MIMO, utilizând abrevierea CFDL-MIMO,
  4. algoritmul MFAC-CFDL este implementat sub forma a două regulatoare SISO ce rulează în paralel, utilizând abrevierea CFDL-2SISO,
  5. algoritmul MFC SISO este utilizat pentru reglarea azimutului și algoritmul MFAC-CFDL SISO este utilizat pentru reglarea relevmentului, cei doi algoritmi rulează în paralel, utilizând abrevierea  $MFC_a$ -CFDL<sub>r</sub>,
  6. algoritmul MFAC-CFDL SISO este utilizat pentru reglarea azimutului și algoritmul MFC SISO este utilizat pentru reglarea relevmentului, cei doi algoritmi rulează în paralel, utilizând abrevierea CFDL<sub>a</sub>-MFC<sub>r</sub>,
  7. algoritmul VRFT MIMO este implementat sub forma unui singur regulator MIMO VRFT, utilizând abrevierea VRFT-MIMO,
  8. algoritmul VRFT este implementat sub forma a două regulatoare SISO VRFT ce rulează în paralel, utilizând abrevierea VRFT-2SISO.
- În al treilea studiu de caz sunt validate experimental cele opt variante de SRA ca și în cel de-al doilea studiu de caz cu regulatoare utilizând algoritmi MFAC-CFDL, MFC și VRFT în diverse combinații, cu aplicarea unor perturbații cu scopul de a stabili care dintre algoritmi de tip model-free reușește să asigure performanțele cele mai bune în reglarea pozițiilor echipamentului, cuantificarea influenței azimutului asupra relevmentului și cuantificarea influenței relevmentului asupra azimutului.

**Capitolul 5** conține concluziile finale, contribuțiile personale, faptul că rezultatele obținute în cadrul tezei sunt sprijinite de 22 lucrări publicate, iar autorul tezei este prim autor la 10 din cele 22 lucrări. Lucrările publicate sunt grupate în funcție de bazele de date internaționale în care sunt indexate:

- 5 lucrări publicate în reviste cu factor de impact indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge), cu un **factor de impact cumulat de 13.792** conform Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2017;
- 2 lucrări publicate în reviste fără factor de impact indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge);
- 9 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge);
- 6 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în bazele de date internaționale IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP.

Lucrările publicate au primit în total **38 citări independente** (excluzând autocitările și citările tuturor coautorilor). **Factorul de impact cumulat al citărilor independente este 60.936** conform Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2017. Citările sunt grupate în funcție de bazele de date internaționale în care sunt indexate:

- 23 citări indexate în Clarivate Analytics Web of Science (18 în reviste și 5 în volume de conferințe);
- 5 citări indexate în bazele de date internaționale Scopus, IEEE Xplore, DBLP;
- 10 citări indexate în Google Scholar.

În ultimul paragraf al ultimului capitol sunt prezentate direcțiile ulterioare de cercetare pe care se va axa autorul tezei de doctorat.

Teza conține trei anexe după cum urmează:

- Anexa A1 conține implementarea în timp discret modelului matematic neliniar simplificat al sistemului aerodinamic cu două rotoare sub formă de funcție.
- Anexa A2 conține implementarea în timp discret în cazul MIMO a algoritmului MFC.
- Anexa A3 conține implementările în timp discret în cazul SISO a algoritmului MFAC în variantele CFDL și PFDL atunci când azimutul este blocat iar reglarea este realizată pentru relevment.

Teza de doctorat cuprinde:

- 129 de pagini,
- 45 de figuri,
- 11 tabele și
- 138 referințe bibliografice.

### **Bibliografie semnificativă**

- [Cam02] M. C. Campi, A. Lecchini, and S.M. Savaresi: “Virtual Reference Feedback Tuning: a direct method for the design of feedback controllers,” *Automatica*, vol. 38, no. 8, pp. 1337–1346, 2002.
- [Cam05] M. C. Campi and S. M. Savaresi, “Virtual reference feedback tuning for non-linear systems,” in *Proc. 44<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Seville, Spain, 2005, pp. 6608–6613.
- [Fli09] M. Fliess and C. Join, “Model-free control and intelligent PID controllers: Towards a possible trivialization of nonlinear control?,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 10, pp. 1531–1550, 2009.
- [Fli13] M. Fliess and C. Join, “Model-free control,” *International Journal of Control*, vol. 86, no. 12, pp. 2228–2252, 2013.



- [Fli14] M. Fliess and C. Join, "Stability margins and model-free control: A first look," in Proc. 2014 European Control Conference, Strasbourg, France, 2014, pp. 454-459.
- [For12] S. Formentin, S.M. Savaresi and L. Del Re, "Non-Iterative direct data-driven tuning for multivariable systems: theory and application," IET Control Theory & Applications, vol. 6, no. 9, pp. 1250-1257, 2012.
- [Hou11a] Z. S. Hou and S. Jin, "Data-driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 22, no. 12, pp. 2173-2188, 2011.
- [Hou11b] Z. S. Hou and S. Jin, "A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 6, pp. 1549-1558, 2011.
- [Hou13a] Z. Hou and Z. Wang, "From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective," Information Sciences, vol. 235, pp. 3-35, 2013.
- [Hou13b] Z. Hou and Y. Zhu, "Model based control and MFAC, which is better in simulation?," IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, no. 13, pp. 82-87, 2013.
- [Pre17] R.-E. Precup, M.-B. Radac and R.-C. Roman, "Model-free sliding mode control of nonlinear systems: Algorithms and experiments," Information Sciences, vol. 381, pp. 176-192, 2017.
- [Rad14] M.-B. Radac, R.-C. Roman, R.-E. Precup, and E. M. Petriu, "Data-Driven Model-Free Control of Twin Rotor Aerodynamic Systems: Algorithms and Experiments," in Proc. 2014 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Antibes, France, 2014, pp. 1889-1894.
- [Rom14b] R.-C. Roman, M.-B. Radac, and R.-E. Precup, "Data-driven model-free adaptive control of twin rotor aerodynamic systems," in Proc. IEEE 9<sup>th</sup> International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2014, pp. 25-30.
- [Rom15a] R.-C. Roman, M.-B. Radac, R.-E. Precup and E.M. Petriu, "Data-driven optimal model-free control of twin rotor aerodynamic systems," in Proc. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville, Spain, 2015, pp. 161-166.
- [Rom15b] R.-C. Roman, M.-B. Radac, R.-E. Precup and A.-I. Stinean, "Two data-driven control algorithms for a MIMO aerodynamic system with experimental validation," in Proc. 2015 19<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing, Cheile Gradistei, Romania, 2015, pp. 736-741.
- [Rom16a] R.-C. Roman, M.-B. Radac and R.-E. Precup, "Mixed MFC-VRFT approach for a multivariable aerodynamic system position control," in Proc. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Budapest, Hungary, 2016, pp. 2615-2620.
- [Rom16b] R.-C. Roman, M.-B. Radac, and R.-E. Precup, "Multi-input-multi-output system experimental validation of model-free control and virtual reference feedback tuning techniques," IET Control Theory & Applications, vol. 10, no. 12, pp. 1395-1403, 2016.
- [Rom16c] R.-C. Roman, M.-B. Radac, R.-E. Precup, and E. M. Petriu, "Data-driven model-free adaptive control tuned by virtual reference feedback tuning," Acta Polytechnica Hungarica, vol. 13, no. 1, pp. 83-96, 2016.
- [Rom16d] R.-C. Roman, M.-B. Radac, R.-E. Precup, and E. M. Petriu, "Virtual reference feedback tuning of MIMO data-driven model-free adaptive control algorithms," in Proc. 7<sup>th</sup> Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, Caparica (Lisbon), Portugal, 2016, pp. 253-260.
- [Rom17c] R.-C. Roman, M.-B. Radac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, "Virtual reference feedback tuning of model-free control algorithms for servo systems," Machines, vol. 5, no. 4, pp. 1-15, 2017.