

RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ

30 noiembrie 2020

Cuprins

1 Rezumatul etapei	1
2 Descrierea științifică și tehnică	1
2.1 Rezultatele etapei	1
2.1.1 <i>Descrieri analitice ale contrângerilor și costurilor prin intermediul ieșirilor plate</i>	1
2.1.2 <i>Analiza a metodelor euristice pentru rezolvarea problemelor de optimizare asociate</i>	2
2.1.3 <i>Analiză metodelor de reducere dimensională pentru reprezentări complexe</i>	2
2.2 Rezultate și mod de diseminare a rezultatelor	3

1 Rezumatul etapei

Obiectivul acestei etape a fost analiza problemei de *sinteză unei traiectorii pentru sisteme neliniare prin parametrizări NURBS*. În particular am studiat modalități de reprezentare a constrângerilor și a costurilor (Activitatea 1.1), metode euristice pentru reducerea timpului de calcul (Activitatea 1.2) precum și metode de reducere a complexității (Activitatea 1.3). Aceste rezultate s-au concretizat prin livrabilele:

D1 site proiect – replan.upb.ro;

D2 raport tehnic pentru cazul nominal, cu strategii de reducere a dimensiunii și a complexității;

D8 publicarea articolului **P1** de categorie Q1; trimiterea și pregătirea pentru publicare a altor trei articole de revistă Q1/Q2 (**P2**), **P3**) și **P5**) precum și a două articole de conferință indexate ISI (**P4**) și **P6**).

2 Descrierea științifică și tehnică

Rezultatele științifice asociate acestei etape acoperă mai multe domenii de interes, pornind de la caracterizări ale traiectoriei prin NURBS, aproximări ale acesteia, reduceri ale complexității, analiza distanței dintre sisteme liniare precum și algoritmi care îmbunătățesc timpul de calcul.

2.1 Rezultatele etapei

Am studiat problematica planificării mișcării prin modelare cu variabile mixte în **P1** în juxtapunere cu abordarea duală, unde traiectoria este calculată offline prin funcții NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines [3, 4]). Plecând de la o secvență monoton crescătoare de momente de timp $\zeta = \{\tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_m\}$, și considerând ordinul $d \leq m - 2$ scriem relația recursivă care definește funcțiile B-spline de ordin d :

$$B_{\ell,d,\zeta}(t) = \frac{t - \tau_\ell}{\tau_{\ell+d} - \tau_\ell} B_{\ell,d-1,\zeta}(t) + \frac{\tau_{\ell+d+1} - t}{\tau_{\ell+d+1} - \tau_{\ell+1}} B_{\ell+1,d-1,\zeta}(t), \quad B_{\ell,0,\zeta}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [\tau_\ell, \tau_{\ell+1}), \\ 0, & \text{altfel.} \end{cases} \quad (1)$$

Funcțiile NURBS de ordin d se obțin ponderând cu termenii (1) cu $\{\omega_1, \dots, \omega_n\} \geq 0$:

$$R_{\ell,d,\zeta}(t) = \frac{B_{\ell,d,\zeta}(t)\omega_\ell}{\sum_{i=1}^n B_{i,d,\zeta}(t)\omega_i}, \quad \forall \ell = 1, \dots, n. \quad (2)$$

2.1.1 Descrieri analitice ale contrângerilor și costurilor prin intermediul ieșirilor plate

Considerăm o regiune $S = \{z \in \mathbb{R}^q : a_k^\top z \geq b_k, k = 1 \dots n_c\}$ și folosind o ieșire plată parametrizată ca $z(t) = \sum_{i=1}^n P_i R_{i,d,\zeta}(t)$, constrângerea $a_k^\top z \geq b_k$ devine la rândul său o curbă B-spline: $\bar{z}_k(t) = \sum_{\ell=s}^{s+d} (a_k^\top P_\ell - b_k) N_{\ell,d,\zeta}(t) \geq 0, t \in [t_s, t_{s+1})$.

Extinzând pentru cazul nelinier și analizând o dinamică UAV simplificată ca exemplu (unde $z(t) = [z_1(t) \ z_2(t)]^\top$) scriem unghiul de ruli și condiția care i se asociază (*underline* $\phi \leq \phi(t) \leq \bar{\phi}$):

$$f(t) = g \tan \phi(t) = \frac{\ddot{z}_2(t)\dot{z}_1(t) - \dot{z}_2(t)\ddot{z}_1(t)}{\sqrt{\dot{z}_1^2(t) + \dot{z}_2^2(t)}} = \frac{\sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=1}^{n+1} (P''_{2,i}P'_{1,j} - P''_{1,i}P'_{2,j}) B_{i,d-2}(t)B_{j,d-1}(t)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n+1} \sum_{\ell=1}^{n+1} (P'_{1,k}P'_{1,\ell} + P'_{2,k}P'_{2,\ell}) B_{k,d-1}(t)B_{\ell,d-1}(t)}}. \quad (3)$$

Pe baza acestei formulări obținem o relație care implică doar punctele de control ale reprezentării (atenție relația anterioară este corectă doar în cazul în care ponderile NURBS sunt egale):

$$g \tan \underline{\phi} \leq \frac{P''_{2,i}P'_{1,j} - P''_{1,i}P'_{2,j}}{\sqrt{P'_{1,k}P'_{1,\ell} + P'_{2,k}P'_{2,\ell}}} \leq g \tan \bar{\phi}, \quad \forall i, j, k, \ell. \quad (4)$$

Abordări similare, dacă modelul matematic nelinier admite o reprezentare plată [5], sunt posibile. În cursul acestei etape am identificat două probleme a căror rezolvare (în stadiu incipient) este propusă în continuare.

2.1.2 Analiza a metodelor euristice pentru rezolvarea problemelor de optimizare asociate

Rezolvarea exactă unei probleme de optimizare nelinieră în cost și/sau constrângeri (precum cea indusă de planificarea unei traiectorii într-un spațiu cu obstacole) este dificilă. Soluții euristice care reduc semnificativ timpul de calcul cu prețul unei scăderi rezonabile a performanței sunt așadar acceptabile:

- folosirea metricii "ν-gap" [1] dintre două sisteme pentru a defini un set de funcții de ponderare ce combină eforturile mai multor regulatoare, proiectate în puncte statice de funcționare diferite, cu scopul de a asigura tranziția în condiții de stabilitate și fără șocuri pe comandă între aceste puncte de funcționare. Algoritmul este testat pe modelul nelinier și incert al unui avion civil de pasageri (un alt exemplu de sistem cu dinamică nelinieră), iar traiectoria impusă în plan transversal este urmărită cu o deviație neglijabilă în plan vertical P3);
- o metodă bazată pe algoritmi genetici pentru proiectarea reguletoarelor cu predictor aplicabile în cazul plutoanelor-șir; problema de optimizare este nelinieră, cu componente de tip releu cu lățime variabilă și urmărește optimizarea comportamentului de descărcare al cozilor de așteptare (spre exemplu alocarea unei rampe de lansare, așteptare pentru accesarea zonei de andocare, cozi de așteptare la accesarea zonelor de memorie sau a resurselor computaționale partajate etc.); pentru ilustrare, s-a considerat un pluton de autohevicele pe un tronson de drum urban P4);
- soluțiile exacte sunt adesea neliniare în cost și/sau neconvexe în constrângeri; prin urmare am studiat o metodă iterativă de învățare a traiectoriei ce rezolvă probleme intermediare simplificate P6).

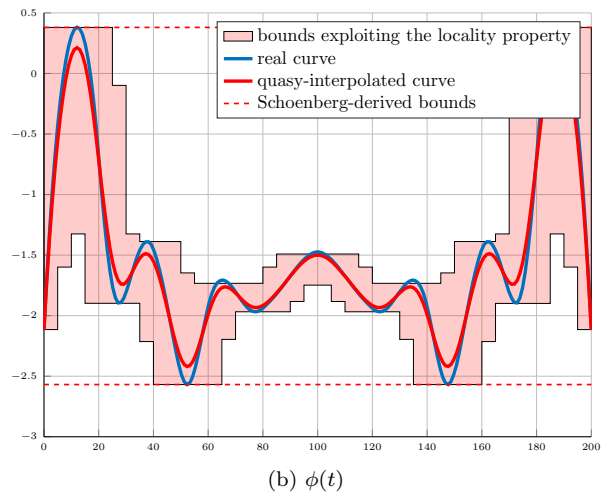
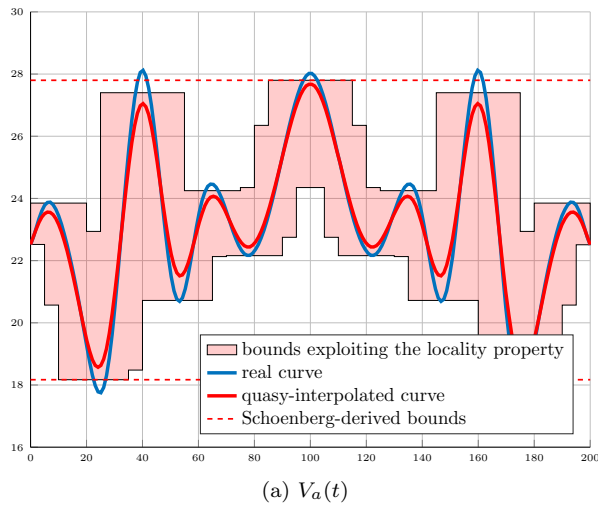
2.1.3 Analiză metodelor de reducere dimensională pentru reprezentări complexe

Reducerea complexității pentru o reprezentare ca cea din (3)–(4) poate fi atacată din mai multe direcții:

- reprezentarea simplificată modelului prin aplicarea unor proceduri de reducere dimensională precum cele studiate în P2) conduce la o parametrizare simplificată: sistemului redus îi corespunde o reprezentare plată care este folosită pentru a genera un profil de referință ce este mai apoi urmărit de modelul complex;
- deoarece reprezentarea plată nu este unică, se pot studia clase de echivalență și selecta reprezentanți care conduc la forme simplificate ale constrângerilor și costurilor [2]; această abordare este relevantă din perspectiva reducerii dificultății problemei de optimizare;
- aproximarea directă curbei B-spline/NURBS; în particular am studiat operatorul Schoenberg, P5):

$$\tilde{f}(t) = \sum_{i=1}^n f(\xi_{i,d,\xi}^*) \tilde{B}_{i,d}(t). \quad (5)$$

Spre exemplu, pentru $f(t) = g \tan \phi$, unghiul de ruli și $f(t) = V_a(t)$, viteza față de sol, am obținut curbele din figura de pe pagina anterioară. Rezultatele sunt încurajatoare și în continuare studiem modalități de a generaliza abordarea și de îmbunătăți valorile teoretice ale bornelor (în prezent acestea sunt conservative). În particular, vom studia cazul în care $f(t)$, așa cum este de faptul cazul pentru noi, este la rândul său o combinație nelinieră de funcții spline.



2.2 Rezultate și mod de diseminare a rezultatelor

Rezultatele acestei etape au fost diseminate prin lucrări publicate (un articol Q1), depuse (două articole Q1 și o conferință de top) și în pregătire pentru publicare (un articol Q1 și o conferință de top), enumerate în continuare. Rutinele Matlab/Python care implementează rezultatele teoretice descrise anterior sunt încărcate în proiectul <https://gitlab.com/florin.stoican/mpsplines>. Fără a enumera toate fișierele auxiliare, elementele principale sunt:

- rutine pentru construcția de funcții B-spline/NURBS cu un vector de timp și ordin date;
- rutine pentru operații de reprezentare, multiplicare și afișare a curbelor *spline* date;
- rutine ce implementează operatorul Schoenberg în vederea reducerii complexității curbei B-spline;
- rutine ce implementează formulări cu variabile mixte/LMI-uri pentru a garanta ocolirea de obstacole.

Articole publicate:

- P1) Ioan, D., I. Prodan, S. Olaru, **F. Stoican** și S.-I. Niculescu. “Mixed-integer programming in motion planning”. În: *Annual Reviews in Control*, 2020. ISSN: 1367-5788. Elsevier **IF: 4.987**. **Q1-IF** (Automation & Control Systems - 12/63). DOI: [10.1016/j.arcontrol.2020.10.008](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.10.008).

Articole trimise:

- P2) **Ionescu, T. C.**, O. V. Iftimie și I. Necoară. “Model reduction with pole-zero placement and matching of derivatives”. În: *Automatica*, 2020. ISSN: 0005-1098. Elsevier **IF: 5.541**. **Q1-IF** (Automation & Control Systems - 9/63), **Q1-IF** (Engineering, Electrical & Electronic - 31/266). Submitted.
- P3) **Sperilă, A.** și **B. D. Ciubotaru**. “Gap Metric Weighting of Airspeed Control for a Civilian Passenger Aircraft”. În: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020. ISSN: 0018-9251. IEEE **IF: 3.672**. **Q1-IF** (Engineering, Aerospace - 3/31), **Q1-IF** (Engineering, Electrical & Electronic - 64/266), **Q2-IF** (Telecommunications - 29/90). Submitted.
- P4) **Pătrașcu, M.** și L. A. Vișcoțel. “Design of Stabilizing Predictor-based Controller for Closed Loop Traffic Control with Real-Coded Genetic Algorithms”, în: *European Control Conference, Rotterdam, Netherlands*. 2021. Accepted.

Articole în pregătire:

- P5) **Stoican, F.** și I. Prodan. “The application of quasi-interpolants for complexity reduction in motion planning”. În pregătire (revistă categoria Q1 din domeniu).
- P6) **Nicu, T. G.**, I. Prodan și **F. Stoican**. “Multi-agent safe navigation using an iterative potential field-based approach in an NMPC framework.” În pregătire (conferință de top din domeniu).

Referințe

- [1] Vinnicombe, G. “Frequency domain uncertainty and the graph topology”. În: *IEEE Trans. Automat. Contr.*, pag. 1371–1383, 1993.
- [2] Nicolau, F. și W. Respondek. “Normal forms for multi-input flat systems of minimal differential weight”. În: *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, pag. 3139–3162, 2019. Wiley Online Library.

- [3] Lyche, T., C. Manni și H. Speleers. “Foundations of spline theory: B-splines, spline approximation, and hierarchical refinement”, în: *Splines and PDEs: From Approximation Theory to Numerical Linear Algebra*, pag. 1–76, 2018. Springer.
- [4] Piegl, L. și W. Tiller. *The nurbs book*, 2012. Springer Science & Business Media.
- [5] Levine, J. *Analysis and control of nonlinear systems: a flatness-based approach*, 2009. Springer Science & Business Media.