

ACADEMIA ROMÂNĂ

Nr. din11.2025

ISMMA

Nr. 248 din 24.11.2025

RAPORT FINAL – ETAPA a 2-a

A grantului de cercetare GAR2023 cod proiect 71 cu titlul

Modelarea de dimensiuni reduse pentru reglarea reziliență a sistemelor complexe

contract nr. 260/23.11.2023

derulat la

INSTITUTUL DE STATISTICĂ MATEMATICĂ ȘI MATEMATICĂ APLICATĂ
“GHEORGHE MIHOC-CAIUS IACOB” (ISMMA)

prin echipa de cercetare formată din

TUDOR C IONESCU – ISMMA, Director

ALEXANDRU DUMITRACHE – ISMMA

ION NECOARĂ – ISMMA

FLORIN STOICAN – UNSTPB

ANDREI SPERILĂ – Supelec, Franța

Raport de progres privind cuantificarea activităților, rezultatelor și a indicatorilor asumați

Este prezentat gradul de realizare al:

- Activităților de cercetare
- Activităților de logistică
- Deplasărilor (legătura acestora cu activitatea proiectului) precum și încadrarea acestora în graficul de realizare planificat.

Raportul conține variantele finale ale lucrărilor raportate la Etapa 1, cu descrieri amănunțite, precum și rezultatele obținute în Etapa a 2-a împreună cu variantele finale ale lucrărilor, la zi. De asemenea, raportul începe cu prezentarea obiectivelor și a activităților propuse, prezentând rezultatele amănunțit.

Activități de cercetare:

În societatea contemporană aflată în plin tumult, procesele industriale și fenomenele importante sunt descrise prin rețele foarte vaste de sisteme interconectate care acoperă adesea zone geografice mari, cum ar fi, de exemplu, sistemele de alimentare, producere și distribuție a energiei electrice etc. Odată cu tendința crescândă de a facilita interconexiunile suplimentare la sistemele învecinate, dimensiunea și complexitatea acestor sisteme vaste vor crește, devenind o adevărată provocare în ceea ce privește planificarea, operarea și reglarea, în situații de criză cum ar fi, de exemplu, perturbări de energie în rețelele electrice, numărul de noi infecții etc., de o importanță critică pentru funcționarea normală a societății.

Pornind de la ideea că pentru a avea o imagine completă atât din punct de vedere științific, cât și tehnologic despre fenomenul/procesul modelat, este necesar un model cât mai bun, problema modelării sistemelor complexe și de mari dimensiuni este crucială. În particular, în ingineria reglării automate, construirea unui regulator care să asigure un comportament dorit, stabil al procesului este în mod unic determinat de modelul procesului.

Proiectul si-a propus următoarele obiective specifice:

O1 Reducerea modelului de sisteme complexe din ecuații și/sau seturi de date măsurate;

- O1.1 Evidențierea topologiei;
- O1.2 Modelare redusă, foarte precisă, bazată pe date;
- O1.3 Calculul dimensiunii și evaluarea complexității;
- O1.4 Modele aproximante pentru control fiabil;
- O1.5 Aproximare pentru reglare descentralizată.

O2 Control/reglare fiabile;

- O2.1 Modele pentru controlul fiabil al sistemelor de alimentare;
- O2.2 Control descentralizat LLQG.

O3: Aplicație: Ecuația perturbată de propagarea undelor (Perturbed Wave PDE);

- O3.1 Reducerea dimensională - aproximarea finit dimensională a PDE;
- O3.2 Strategii de control a ecuației perturbate a undei.

Obiectivele sunt transpuse în activități și sub-activități, dintre care se prezintă pe cele aferente primei etape la care se referă prezentul raport:

Activitatea 1: Algoritmi de modelare cu dimensiuni reduse - reducere dimensională

- 1.1 Extragerea de informații din procesarea datelor
- 1.2 Extragerea topologiei rețelei de sisteme
- 1.3 Reducerea dimensională pentru sinteza de regulator

Activitatea 2: Strategii de reglare fiabilă

- 2.1 Sinteza de reglare rezistentă la defecte
- 2.2 Sinteza de reglare descentralizată

Activitatea 3: Aplicație: ecuația perturbată de propagare a undei

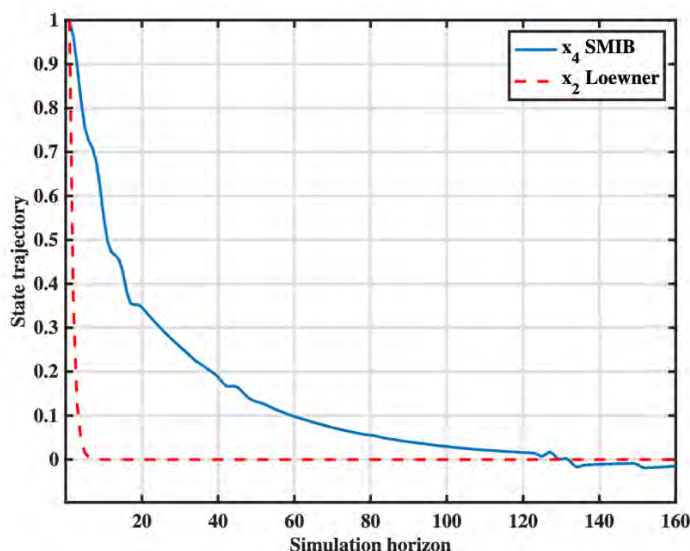
- 3.1 Calculul aproximărilor liniare, finit-dimensionale – reducere dimensională
- 3.2 Sinteza de reglare fiabilă la defecte și descentralizată

Activitatea 4: Managementul proiectului și diseminarea rezultatelor

- 4.1 Managementul proiectului
- 4.2 Diseminare în reviste Q1- Q3 și participări la conferințe

În cele de mai jos prezentăm rezultatele cercetării proiectului:

[1] T. C. Ionescu, O. V. Iftime and I. Necoara. **Data-driven Loewner matrices-based modeling and model predictive control of a single machine infinite bus model. Mediteranean Control Conference, MED2024, Creta, Grecia, WOS:001565329000101, DOI: 10.1109/MED61351.2024.10566187, publicat în volumul conferinței.** În această lucrare, propunem o abordare de modelare din date intrare-ieșire și prescrierea tuturor polilor dinamicilor sistemului (neliniar) cu ajutorul matricelor Loewner. Aproximarea obținută este potrivită pentru aplicarea de control predictiv bazat pe model (MPC) cu rezultate foarte bune. – Activitate 1; 3.1.



Performanță reglare predictivă cu aproximarea din date a unui model neliniar de generator de energie electrică

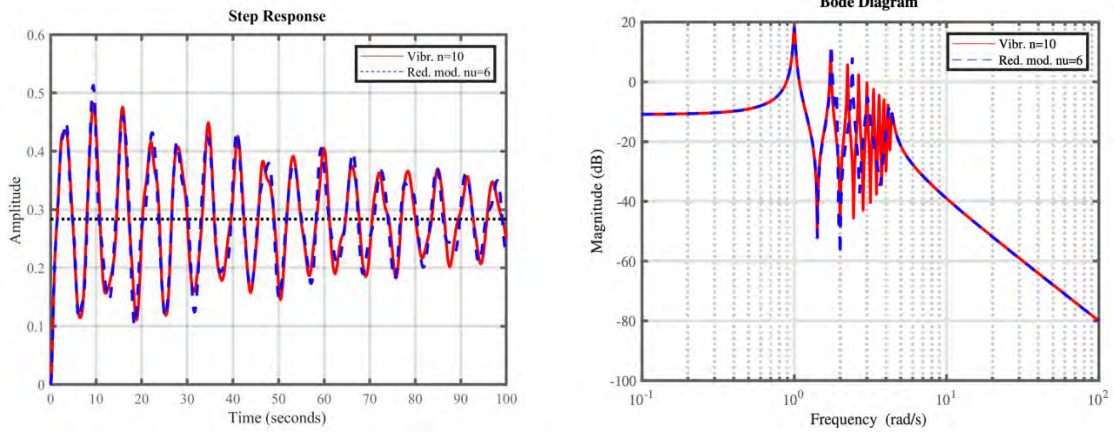
[2] X. Cheng, T. C. Ionescu, O. V. Iftime. **Moment matching for second order systems with pole-zero placement. 63rd IEEE Conference on Decision and Control, CDC2024, Milano, Italia,**

depus la 15 martie 2024, WOS:001445827201136, DOI: 10.1109/CDC56724.2024.10886736, publicat în volumul indexat ISI al conferinței. În această lucrare, propunem o abordare de modelare din date intrare-ieșire și prescrierea polilor și a dinamicilor sistemului de ordin al doilea i.e.,

$$H(s) = (C_1 s + C_0)(Ms^2 + Ds + K)^{-1}B,$$

unde M, D, K sunt matrice pătrate de ordin n , pozitiv definite, cu ajutorul tehnicilor de egalare a momentelor unei funcții raționale. Se arată că rezultatele funcționează pentru sisteme cu matricea de disipare D nenulă!

Astfel, se calculează o familie de aproximări descrise de sisteme de ordinul al doilea, invariante în timp, finite-dimensional, de dimensiuni mici. – Activitate 1; Activitate 3.



Răspunsul la semnal treaptă și răspunsul în frecvență al unui sistem de ordin 6 care aproximează un sistem vibrant format din zece oscilatoare mecanice.

[3] T.G. Nicu, F. Stoican, D. Ioan, I. Prodan. Design of a Navigation Function for a Polyhedral World. 16th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing (CONTROLO2024), Porto, Portugalia, https://doi.org/10.1007/978-3-031-81724-3_31, publicat de către Springer (Lecture Notes on Electrical Engineering). În această lucrare, este propusă o nouă metodă de implementare a funcțiilor de navigare a agenților în diverse medii cu obstacole, în vederea evitării coliziunilor cu acestea, respectiv urmărirea țintelor din mediile cu pricina. – Activitate 2. Inițial se definește o așa-numită lume sferică, care poate fi mapată în continuare în multe alte topologii diferite folosind o serie de transformări difeomorfe. Această configurație specifică permite în continuare exploatarea principalelor avantaje ale abordării funcției de tip sumă

$$\beta(P, q) = \sum_{j=1}^N (a_j^\top q - b_j + |a_j^\top q - b_j|) = 2 \sum_{j: a_j^\top q > b_j} (a_j^\top q - b_j),$$

în ceea ce privește capacitățile de evitare a coliziunilor obstacolelor ale unui agent, funcție de sumă care este utilizată pentru a induce o funcție de navigație eficientă, judecând nu numai din perspectiva de calcul, ci și din punctul de vedere al minimelor locale.

Implementarea strategiei dezvoltate pentru cazul obstacolelor poliedrale este dat de parametrul

$$N(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon} \cdot \max_{\ell=1, \dots, N} a_\ell^\top \left(q_d + \bar{\gamma}_d \sum_{j=1}^N |a_j| \left[2(M+1) + d \sum_{i=0}^M |b_j^0 - b_j^i| \right] \right)$$

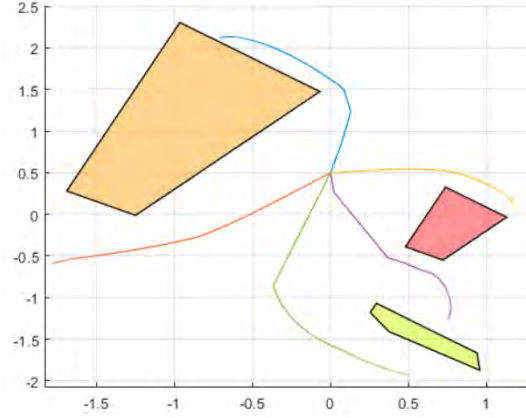


Fig. 2: Polyhedral world example (obstacles, target point and feasible trajectories converging to it)

[4] T.G.Nicu, F.Stoican, D.Ioan, I.Prodan. Safe Motion Along Harmonic Potential Surfaces with Cardinal Spline Dirichlet Boundary Conditions. 63rd IEEE Conference on Decision and Control, CDC2024, Milano, Italia, WOS:001445827205071, DOI: 10.1109/CDC56724.2024.10886015. – Activitate 2.

Această lucrare se referă la generarea și utilizarea funcțiilor armonice pentru evitarea obstacolelor și urmărirea țintelor. Pentru fiecare celulă a unui spațiu de tip poliedru, generăm o suprafață de potențial armonic dintr-o condiție de tip Dirichlet la limita spațiului. Condiția este exprimată ca o curbă B-spline cardinală netedă, descrisă de

$$M_0(\theta) = \begin{cases} 1, & \forall \theta \in [0, 1), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$M_p(\theta) = \frac{\theta}{p} M_{p-1}(\theta) + \frac{p+1-\theta}{p} M_{p-1}(\theta-1),$$

$$B_{k,p,z}(\theta) = B_{0,p,z}(\theta-k) := M_p(\theta-k), \quad \forall k \in \mathbb{Z}.$$

Condiția la limită este descrisă ca

$$h(\theta) = \sum_{k \in \mathcal{K}} P_k \sigma_k(\theta), \quad \forall \theta \in [-\pi, \pi].$$

Această alegere permite astfel un calcul eficient al potențialului care evită gradientii mari caracteristici condițiilor limită constante pe porțiuni utilizate de obicei în literatură.

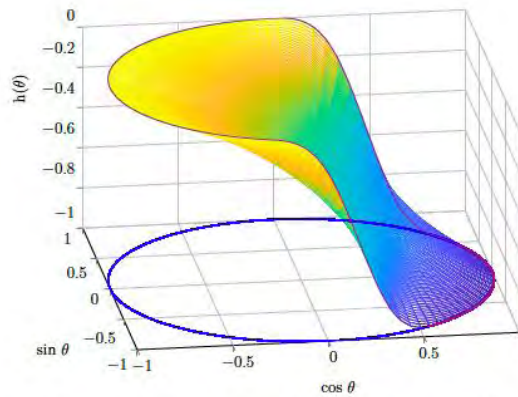


Fig. 3: B-spline curve as Dirichlet boundary condition and the harmonic potential induced by it

Enumerând toate perechile de fațete „de intrare” și „de ieșire” pentru fiecare celulă fezabilă (una care nu face parte din obstacole) și atașând un cost relevant fiecărei astfel de perechi (de exemplu,

proporțional cu lungimea căii din interiorul celulei), ajungem la un graf orientat unde, prin construcție, toate căile posibile care leagă sursa și ținta evită obstacolele. Calea optimă rezultă dintr-o variație a algoritmului lui Dijkstra.

[5] M.O. Yegin, O.V. Iftime, H. Ozbay, T.C. Ionescu. **Approximation of H_∞ Controllers for Unstable Time Delay Systems**, European Control Conference, Salonic, Grecia, 2025, prezentată în sesiunea invitată cod 1bh6a, DOI: 10.23919/ECC65951.2025.11187041 și publicată în volumul indexat ISI al European Control Conference 2025, în care se aproximează un regulator cu întârzieri care rezolvă o problemă de reglare robustă H-infini (Loopshaping) pentru un proces infinit-dimensional cu întârzieri. – Activitate 2; 3.1.

În această lucrare sunt studiate aproximările regulatorului H_∞ -optimal rezultate din minimizarea unei probleme de sensibilitate mixtă

$$\gamma_{\text{opt}} = \inf_{C \in \mathcal{C}(P)} \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 T \end{bmatrix} \right\|_\infty$$

pentru un proces

$$P(s) = \frac{e^{-hs}}{s-a} \quad h > 0, \quad a > 0$$

cu întârzieri, instabil de ordinul întâi, cu ponderi de ordinul întâi

$$W_1(s) = \frac{1}{s}, \quad W_2(s) = k s, \quad k > 0.$$

Se știe că regulatorul optim are o structură specială în care un regulator PI și un filtru FIR formează părțile finit dimensionale și, respectiv, infinit dimensionale ale acestuia

$$C_{\text{opt}}(s) = C_0(s) \left(\frac{1}{1 + H(s)} \right)$$

Este aproximată partea infinit dimensională prin funcții de transfer raționale de ordin fix folosind diverse metode din literatura de specialitate. Sunt comparate erorile de aproximare H_∞ obținute cu următoarele metode de aproximare rațională pentru partea de răspuns finit FIR a regulatorului: comenzile *systune* și *ssest* din Matlab, aproximarea normei Hankel (HNA), egalarea momentelor (MM), trunchierea echilibrată (*balred*), algoritmul iterativ rațional Krylov (IRKA) și aproximarea Pade.

$\hat{h}$	γ_{opt}	ν	γ_{ssest}	γ_{balred}	γ_{hna}	γ_{systune}	γ_{irka}	γ_{pade}	γ_{mm}	γ_{pa}
0.25	4.9440	4	5.2530	5.2280	5.2907	5.2063	5.2068	5.2475	5.1986	5.2210
		6	5.1262	5.1567	5.1797	5.1156	5.1184	5.2148	5.1002	5.1886
0.75	8.9648	4	13.114	13.216	13.910	12.501	12.831	12.993	12.064	12.599
		6	11.095	11.551	11.912	11.011	11.024	12.489	10.518	11.754

TABLE I
PERFORMANCE LEVELS OF EACH APPROXIMATION FOR $\hat{h} = \{0.25, 0.75\}$ SECONDS

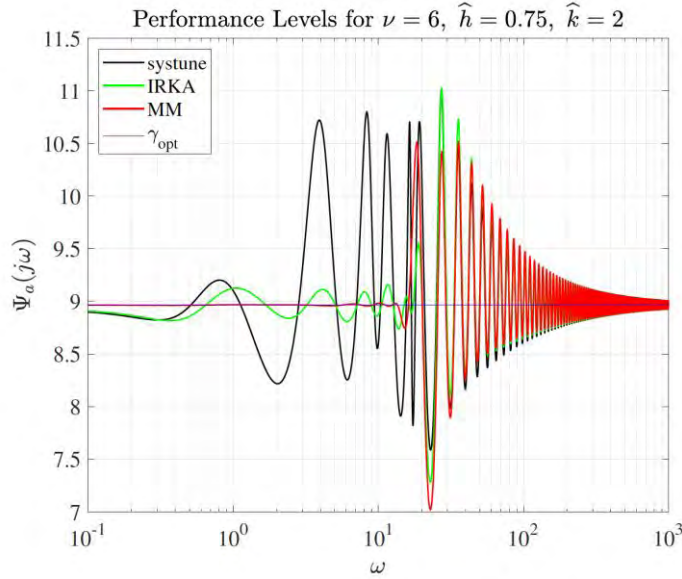


Fig. 4. Performance of various methods for $\hat{h} = 0.75$, $\hat{k} = 2$, $\nu = 6$.

[6] T. C. Ionescu, O. V. Iftime and R. Stefan. Loewner matrices-based loopshaping design with closed-loop pole placement, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2025, Early Access, DOI: 10.1109/TAC.2025.3625464.

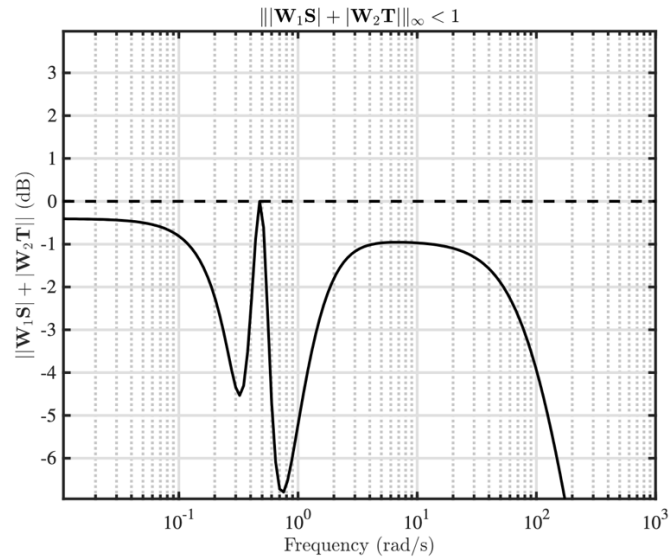
Modelele de ordin redus potrivească (egalează) un set de momente prescrise ale sistemului de întârziere dat și lasă grade de libertate utile pentru îndeplinirea altor constrângeri legate de controlul de tip Loopshaping, așa cum ne propunem în acest proiect.

Arătăm că în familia modelelor parametrizate care realizează potrivirea momentelor există un model care realizează simultan plasarea unui set de poli de prescriși ai buclei închise, plasarea unui set restrâns de poli, precum și a unui set restrâns de zerouri ale lui L astfel încât inegalitatea de performanță și stabilitate robuste să fie satisfăcută.

Potrivirea momentelor funcției de transfer în frecvențele prescrise într-un set de puncte de interpolare induc rezolvarea constrângerilor aproape necesare și aproape suficiente pentru ca inegalitatea de performanță și stabilitate robuste să fie satisfăcută.

Metoda propusă: În această lucrare, folosim tehnici de potrivire a momentelor pentru a dezvolta o metodă de proiectare de regulator robust loopshaping pentru un sistem cu un proces nominal necunoscut dintr-o clasă de sisteme de dimensiuni finite, liniare, invariante în timp (LTI), stabile, de fază minimă, cu incertitudini multiplicative, astfel încât să fie garantată performanța robustă în buclă închisă. În primul rând, problema reducției dimensionale prin potrivirea momentelor în domeniul timp cu păstrarea proprietăților este revizitată pe scurt. Oferă o clasă de modele de ordin ales, în care parametrii liberi sunt determinați pentru a obține proprietățile dorite. Problema de proiectare de regulator robust de tip loopshaping este reformulată în termenii unei probleme de potrivire a momentelor cu valori fixate în -1 și, respectiv, 0 , cu constrângeri suplimentare de poli, zerouri și egalare de momente suplimentare. Apoi, tehnicile de potrivire de momente cu matrice Loewner cu constrângeri dezvoltate într-un cadru bazat pe date sunt formulate pentru procese necunoscute. Metoda clasică de loopshaping este combinată cu plasarea polilor în buclă închisă, în formalism Loewner, pentru a rezolva problema de reglare robustă. Ilustrăm rezultatele de sinteză de regulator doar din date pe un exemplu de referință. – Activitate 1; Activitate 2.

$$\mathbf{L}(s) = \frac{1.797s^3 + 6.09s^2 + 5.436s + 1.538}{s^4 + 2.803s^3 + 1.801s^2 + 0.5463s + 0.1538}$$



Sistem calculat din seturi de date frecvențiale cu fixare polilor buclei închise prin parametrizarea modelului care rezolvă problema sintezei unui regulator care asigură performanță robustă și stabilitate robustă pentru un proces fără model matematic cunoscut

[7] Y. Nabou, I. Necoara. **Regularized higher-order Taylor approximation methods for nonlinear least-squares**, 2025, provisionally accepted in *SIAM Journal on Control and Optimization*, arXiv preprint, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.02370>. – Activitate 1

În această lucrare, este dezvoltată o metodă Taylor regularizată de ordin superior pentru rezolvarea problemelor așa-zis compozite (de exemplu, metoda celor mai mici pătrate neliniare). La fiecare iterație, este înlocuită fiecare componentă netedă a funcției obiectiv cu o aproximare Taylor de ordin superior cu o regularizare adecvată, conducând la un algoritm de aproximare Taylor regularizată de ordin superior (RHOTA). Sunt calculate garanții de convergență globală pentru algoritmul RHOTA. În particular, sunt demonstrate garanții de convergență punctuală staționară pentru iterațiile generate de RHOTA și, utilizând o proprietate de tip Kurdyka-Łojasiewicz (KL) a funcției obiectiv, se obțin rate îmbunătățite în funcție de parametrul KL. Când aproximarea Taylor este de ordinul 2, este creată o implementare eficientă a algoritmului RHOTA, demonstrând că subproblema neconvexă rezultată poate fi rezolvată eficient utilizând instrumente standard de optimizare convexă. În plus, este inclus și comportamentul și eficacitatea algoritmului RHOTA în gestionarea sistemelor de ecuații neliniare și a problemelor de optimizare cu constrângeri de tip egalitate neliniară, derivând noi rate în condițiile constrângerilor de tip calificare îmbunătățită (constrained qualification conditions). Ca exemplu ilustrativ, este considerată rezolvarea problemei de recuperare a fazei cu un algoritm de ordin superior al punctului proximal, demonstrând rata sa rapidă de convergență pentru această aplicație. Simulările numerice privind recuperarea fazei și problemele de control al feedback-ului de ieșire demonstrează, de asemenea, eficacitatea și performanța metodelor propuse în comparație cu unele metode și algoritmi de optimizare de ultimă generație.

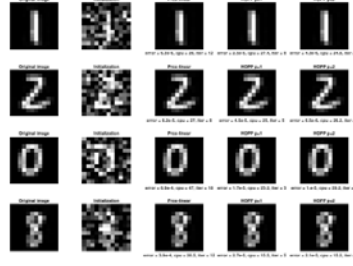


Fig. 1: Performance of prox-linear method [12] and HOPP for $p = 1$ and $p = 2$ with $M = 0.1$ on 12×12 digit images: initialization satisfying $\text{dist}(x_0, x^*) < \|x^*\| \sigma_0 / L$.

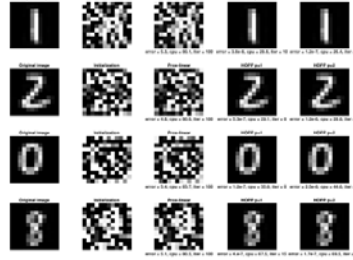


Fig. 2: Performance of prox-linear method [12] and HOPP for $p = 1$ and $p = 2$, with $M = 0.01$ on 12×12 digit images: random initialization x_0 .

[8] L. Romero-Ben, P. Irofti, F. Stoican, V. Puig. Nodal Hydraulic Head Estimation through Unscented Kalman Filter for Data-driven Leak Localization in Water Networks, IFAC Papers Online, vol. 58, no. 4, 2024, DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.195, WOS:001296047100012.

În această lucrare, este prezentată o metodologie de estimare a înălțimii hidraulice nodale pentru rețelele de distribuție a apei (WDN) bazată pe o schemă de filtru Kalman de tip „unscented” (UKF) cu aplicare pentru localizarea scurgerilor. UKF rafinează o estimare inițială a stării hidraulice, luând în considerare modelul de predicție, precum și măsurătorile disponibile de presiune și cerere. În acest scop, oferă pași personalizați de predicție și asimilare a datelor:

$$h^{[k+1]} = f(h^{[k]}, \Omega^{[k]}, \Phi^{[k]}) = \alpha h^{[k]} + (1 - \alpha)(\Phi^{[k]})^{-1} \Omega^{[k]} h^{[k]}$$

În plus, metoda este îmbunătățită prin actualizarea dinamică a matricelor pondere a funcției de predicție:

$$\omega_{ij}^{[k]} = \begin{cases} w_{ij}^{AW}(h_i^{[k]}, h_j^{[k]}), & \text{mod}(k, K_u) = 0, \\ \omega_{ij}^{[k-1]}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Testarea de performanță pe etalonul Modena în condiții realiste demonstrează eficacitatea metodei în îmbunătățirea estimării stării și a localizării scurgerilor bazate pe date. – Activitate 1.1; Activitate 2. Algoritmul de predicție cu corecție și rețeaua pe care este aplicat:

Algorithm 1 UKF-GSI

Require: h_0, y, Q, R, K

- 1: Initialize: $h^{[0]} = h_0$
 - 2: **for** $k = 0, \dots, K - 1$ **do**
 - 3: Correction (8): $h^{[k]} \leftarrow (y - g(h^{[k]}), R)$
 - 4: Prediction (5): $h^{[k+1]} \leftarrow (f(h^{[k]}), Q)$
 - 5: **end for**
 - 6: **return** $h_{UKF} = h^{[K]}$
-

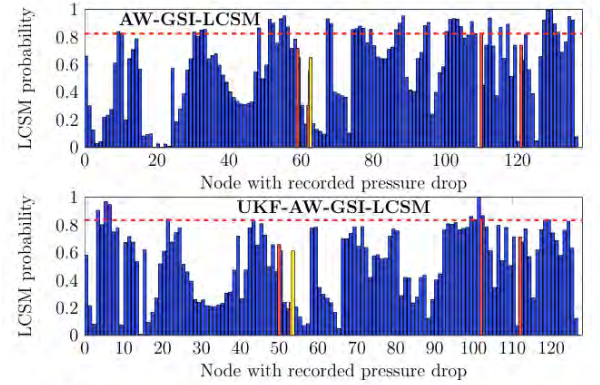
Algorithm 2 UKF-AW-GSI

Require: $h_0, y, Q, R, W_0^{AW}, D_0^{AW}, K, K_u$

- 1: Initialize: $h^{[0]} = h_0, \Omega^{[0]} = W_0^{AW}, \Phi^{[0]} = D_0^{AW}$
 - 2: **for** $k = 0, \dots, K - 1$ **do**
 - 3: Correction (8): $h^{[k]} \leftarrow (y - g(h^{[k]}), R)$
 - 4: Prediction (9): $h^{[k+1]} \leftarrow (f(h^{[k]}, \Omega^{[k]}, \Phi^{[k]}), Q)$
 - 5: AW update (10): $[\Omega^{[k+1]}, \Phi^{[k+1]}] \leftarrow (h^{[k]}, \Omega^{[k]}, K_u)$
 - 6: **end for**
 - 7: **return** $h_{UKF} = h^{[K]}$
-

Table 1. Modena characteristics summary

Property	Value
Junctions	268
Pipes	317
Reservoirs (water inlets)	4
Total pipe length	71.8 km
Total nodal demand	$\sim 400 \ell/s$



(b) LCSM probability of the nodes with pressure drops.

[9] F. Stoican, S.S. Mihai, M. Mönnigmann and B.D. Ciubotaru. **Computing the explicit MPC solution in the constrained zonotope case**, *Conference on Decision and Control (CDC2024)*, Milano IT, DOI: 10.1109/CDC56724.2024.10885893, WOS:001445827200130.

Rezolvarea problemei reglării predictive pe baza de model (MPC) implică enumerarea unei liste de regiuni critice și legile lor auxiliare de feedback. Din păcate, numărul lor și timpul necesar pentru a le calcula crește exponențial odată cu dimensiunea problemei (dimensiunea modelului pe spațiul stărilor și lungimea orizontului de predicție). Arătăm că atunci când, așa cum este adesea cazul, constrângerile problemei iau forma unor casete sau zonotopi, domeniul fezabil rezultat poate fi descris în mod compact ca un zonotop constrâns. Ulterior, investigăm dacă și în ce circumstanțe, structura combinatorică a zonotopului constrâns accelerează calculul soluției explicite. – Activitate 2.

Pentru un sistem liniar, dinamic discret

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k,$$

Este formulată următoarea problema de reglare predictivă cu model (MPC)

$$\begin{aligned}
 u^* &= \arg \min_u x_{k+N|k}^\top S x_{k+N|k} + \sum_{i=0}^{N-1} \ell(x_{k+i|k}, u_{k+i|k}) \\
 \text{s.t. } & x_{k+i+1|k} = A_d x_{k+i|k} + B_d u_{k+i|k}, \\
 & x_{k+i|k} \in \mathcal{X}, \quad u_{k+i|k} \in \mathcal{U}, \\
 & x_{k+N|k} \in \mathcal{T}.
 \end{aligned}$$

Aceasta este reformulată ca o problemă de optimizare pătratică multiparametrică

$$\begin{aligned}
 \arg \min_{u_{[0:N-1]}} & \frac{1}{2} u_{[0:N-1]}^\top \tilde{Q} u_{[0:N-1]} + x_0^\top \tilde{H} u_{[0:N-1]} \\
 \text{s.t. } & A u_{[0:N-1]} \leq E x_0 + b,
 \end{aligned}$$

cu condiția geometrică rescrisă pe spațiul

$$P([A \quad -E], b) = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{[0:N-1]} \\ x_0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{Nm+n} : [A \quad -E] v \leq b \right\}.$$

Problema este reformulată pe un zonotop special descris și se demonstrează o condiție necesară și suficientă pentru care problema are soluție. Rezultatul central dă soluția problemei de tip MPC

$$Z^\top (G_D^\top \tilde{Q} G_D \xi^* + G_D^\top \tilde{Q} c_D + G_D^\top \tilde{H}^\top x_0) = \mathbf{0}_{n_Z}, \quad (27a)$$

$$F_D \xi^* - \theta_{1,D} - \theta_{2,D} x_0 = \mathbf{0}_{\tilde{n}_c}, \quad (27b)$$

$$Y_A \xi^* - \mathbf{1}_{n_A} = \mathbf{0}_{n_A}, \quad (27c)$$

$$\mu_{\mathcal{I}}^* = \mathbf{0}_{\bar{D}-n_A}, \quad (27d)$$

$$Y_{\mathcal{I}} \xi^* - \mathbf{1}_{\bar{D}-n_A} \leq \mathbf{0}_{\bar{D}-n_A}, \quad (27e)$$

$$\mu_{\mathcal{A}}^* > \mathbf{0}_{n_A}, \quad (27f)$$

where² $Z \in \mathbb{R}^{n_Z \times \bar{D}}$ is given by

$$Z = G_D^\perp \ker \left(\begin{bmatrix} F_D \\ Y_A \end{bmatrix} G_D^\perp \right), \text{ with } G_D^\perp = \left(\ker(\ker G_D)^\top \right), \quad (28)$$

and where $\mathcal{I} = \{1, \dots, 2\bar{D}\} \setminus \mathcal{A}$.

[10] Vincent Marguet, Florin Stoican and Ionela Prodan. Energy-Efficient Trajectory Planning with B-Splines and the Schoenberg Quasi-Interpolant, Conference on Decision and Control (CDC2024), Milano IT, Doi: 10.1109/CDC56724.2024.10886501, WOS:001445827207036.

Puține studii abordează provocarea de a minimiza consumul de energie în timpul generării traiectoriei, în special în contextul dinamicii multicopter, caracterizată printr-o neliniaritate puternică. Această lucrare introduce o abordare nouă prin formularea consumului de energie în funcție de punctele de control B-splines, permițând optimizarea cuprinzătoare a cheltuielilor totale de energie pe toată traiectoria.

Modelul dinamicii multicopter este un model complex format din ecuații diferențiale ordinare neliniare, de forma

$$\mathbf{x} = f_{\mathbf{x}}(\mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \ddot{\mathbf{z}} \quad \ddot{\mathbf{z}}) \quad \mathbf{u} = f_{\mathbf{u}}(\mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \ddot{\mathbf{z}} \quad \ddot{\mathbf{z}} \quad \mathbf{z}^{(4)})$$

unde ecuațiile de stare, și ale comenzilor, precum și cele ale ieșirilor măsurate sunt descrise de

$$\phi = \arcsin(\Phi_x s - \Phi_y c) \quad (9a)$$

$$\theta = \arctan(\Theta_x c + \Theta_y s) \quad (9b)$$

$$x = \frac{\Phi_x s - \Phi_y c}{c\phi} \quad (9c)$$

$$y = c\phi c^2 \theta (\Theta_x c + \Theta_y s) \quad (9d)$$

$$z = -s\phi c^2 \theta (\Theta_x c + \Theta_y s) + \frac{c\theta}{c\phi} \quad (9e)$$

$$T = m\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + (\ddot{z} + g)^2} \quad (9f)$$

$$\tau_\phi = J_x x + (J_z - J_y) y z \quad (9g)$$

$$\tau_\theta = J_y y + (J_x - J_z) z x \quad (9h)$$

$$\tau_\psi = J_z z + (J_y - J_x) x y \quad (9i)$$

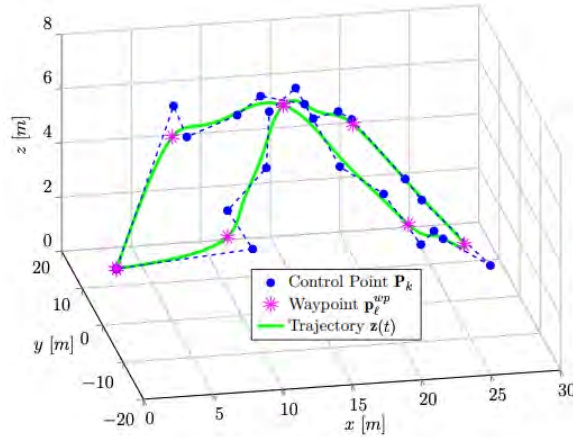
Traietoriile de energie minimă, numite traiectorii eficiente energetic sunt obținute rezolvând următoarea problema de optimizare

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{z}(t)} \quad & \int_0^{T_f} \mathcal{E}(\mathbf{z}(t)) dt \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\mathbf{z}(t)) \leq 0 \quad 0 \leq t \leq T_f \\ & h_j(\mathbf{z}(t)) = 0 \quad 0 \leq t \leq T_f \end{aligned}$$

Pentru a atenua complexitatea reprezentării, este folosit cvasi-interpolantul Schoenberg,

$$f(t) = \sum_{k=0}^{n-1} f(t_k) B_{k,\tilde{p},\tilde{\xi}}(t) \quad t_k = \frac{\tau_{k+1} + \dots + \tau_{k+\tilde{p}-1}}{p-1},$$

o combinație de B-splines, care nu numai că facilitează rezolvarea problemei de optimizare, dar și reduce efectiv efortul de calcul.



(a) 3D trajectory

Abordarea este validată prin două scenarii distincte: o traiectorie convențională utilizată în agricultura de precizie și un scenariu care implică manevre mai agresive. – Activitate 2.

[11] Alexandru Dumitrache and T.C Ionescu, *Reduced Order Modeling for Aerodynamic and Flow Control - a brief Survey*, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2024), Creta, (acceptată pentru publicare in AIP Conf. Proc.).

În această lucrare s-au efectuat o trecere în revistă și o sinteză a modelelor de reducere dimensională utilizate până în prezent pentru aerodinamică și controlul curgerii. După o scurtă descriere și prezentarea tipului de model de reducere (intruziv sau neintruziv) sau a tipului de stare a curgerii (staționară sau nestaționară), s-au discutat unele rezultate în contextul acestui subiect. S-a intenționat și o trecere în revistă a unor metode de reducere a ordinului dimensional al unui model, în special a celor utilizate în ultimele decenii în investigațiile privind curgerea fluidelor. Accentul a fost pus pe tehnica Proper Orthogonal Decomposition (POD), care este utilizată în special în aerodinamică. Au fost prezentate pe scurt două cazuri test care utilizează tehnica POD, dintre care unul utilizează o metodă îmbunătățită (Missing Point Estimation) și în care se obține o reducere suplimentară a unui sistem complex (Fig. 11.1). Timpul de calcul a fost redus de aproximativ 100 de ori.

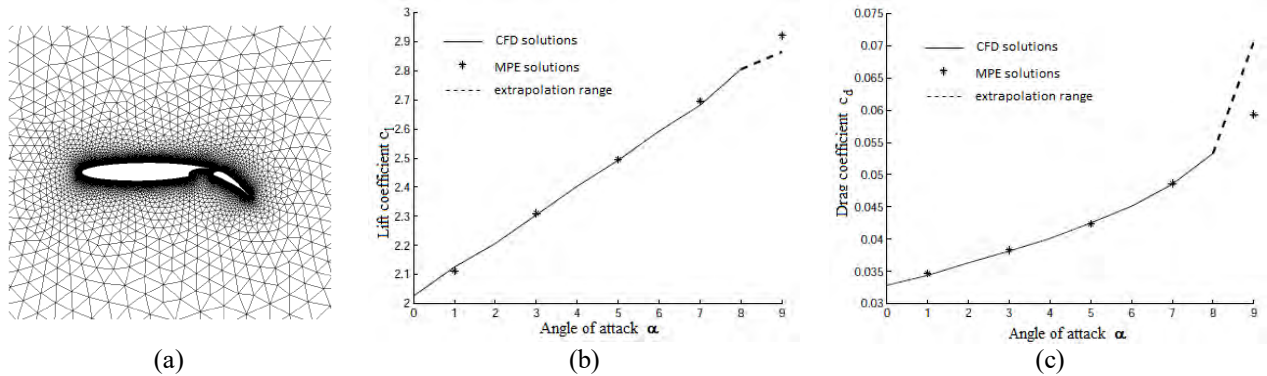


FIGURE 11.1 a) Grila de calcul în apropierea profilului aerodinamic pentru o configurație de decolare; (b) coeficienții de portanță aerodinamică și (c) rezistență la înaintare ($Re = 10.5 \times 10^6$, $M_\infty = 0.22$, $0^\circ < AoA < 9^\circ$).

Au fost discutate, de asemenea, unele dezavantaje sau limitări ale tehnicilor POD, cum ar fi, de exemplu, cazul în care, la un anumit unghi de atac (AoA) care depășește o anumită limită pentru o curgere în jurul unui profil aerodinamic sau al unei aripi, se produce un fenomen de blocaj (“stalling”), care nu poate fi capturat în instantanee (snapshots). Cu toate acestea, în inginerie, s-a demonstrat că aceste metode de ordin redus obținute cu POD pot fi utilizate cu succes în procedurile de optimizare sau în proiectarea preliminară, deoarece timpul de calcul este mult redus. Aceste cazuri prezentate demonstrează utilitatea metodelor de ordin redus în aerodinamică, deoarece, făcând un compromis de obținere a unor rezultate în limita de eroare mai mică de 10%, aceste modele sunt calculate mult mai rapid, folosind calculatoare cu performanțe uzuale și, prin urmare, mult mai economice. - Activitate 3; /3.1; - Activitate 4. /4.2.

[12] F. Stoican, T.G. Nicu, D.M. Ioan, I. Prodan, Computational aspects for the Koditschek-Rimon navigation function, IFAC-PapersOnLine, Volume 59, Issue 11, 2025, Pages 144-149, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.539>. – Activitate 2

Revenim aici la ideea funcției de navigare Koditschek-Rimon pentru cazul lumii sferice statice. Deși structurile teoretice sunt bine cunoscute, detaliile despre calculele numerice ale limitelor asociate lipsesc în literatura de specialitate. Prezentăm o implementare completă a acestor limite și propunem direcții viitoare pentru reducerea conservatismului lor.

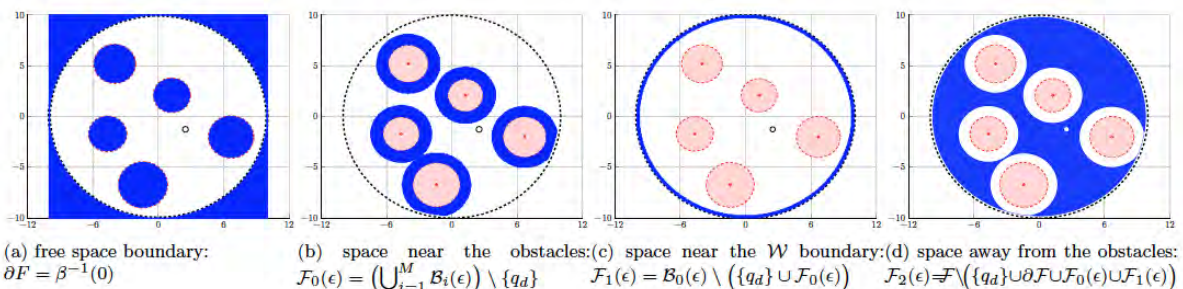


Fig. 4. Illustration of space partitioning for the sphere world example

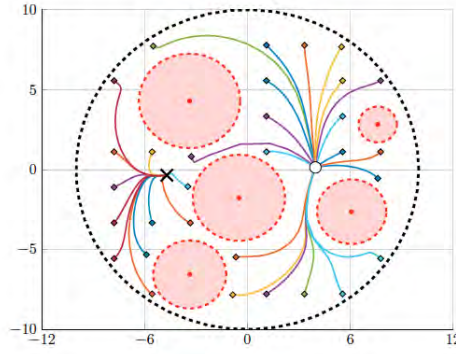


Fig. 5. Failure scenario for the same tuning parameter k value as in Fig. 1 ($k = 5$)

[13] B.M. Bălăceanu, F. Stoican, B.D. Ciubotaru, I. Prodan, Derivative-free Kalman filtering for a six-wheeled rover, European Journal of Control, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2025.101334>, Early Access. – Activitate 1.1, 1.2; Activitate 2
Scopul acestei lucrări este de a oferi un filtru Kalman fără componenta derivativa (DKF) pentru un vehicul cu șase roți, ca alternativă la filtrele Kalman clasice.

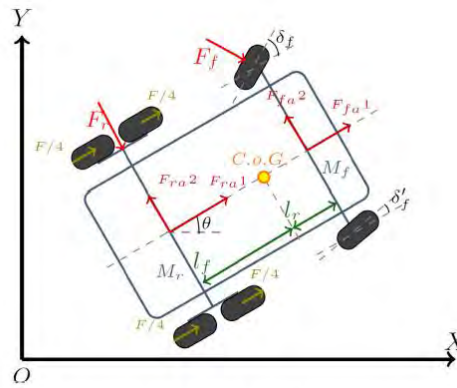


Fig. 2. Rover kinematics.

Modelul dinamic al vehiculului este

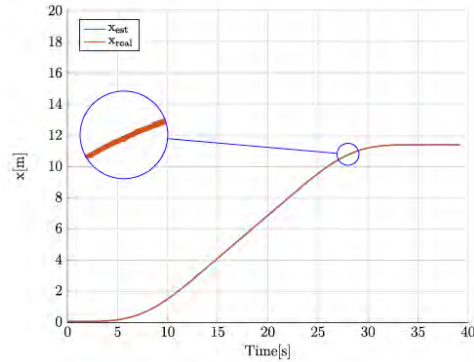
$$\begin{aligned}\dot{x} &= u_r \cos \theta, \\ \dot{y} &= u_r \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \frac{u_r}{L} \tan \delta_f, \\ \dot{\delta}_f &= u_{\delta}, \\ \dot{u}_r = a_l &= \frac{F \cos^2 \delta_f - M_f \delta_f u_r \tan \delta_f}{M \cos^2 \delta_f + M_f \sin^2 \delta_f}, \\ j_l = \dot{a}_l = \ddot{u}_r &= u_j.\end{aligned}$$

DKF elimină riscurile pe care le prezintă filtrul Kalman extins (EKF), bazat pe calculul Jacobienilor, atunci când este implementat pe platforme cu precizie numerică limitată. De asemenea, este mai eficient din punct de vedere computațional decât filtrele Kalman de tip unscented, păstrând în același timp performanțe similare. DKF este conceput pentru un vehicul cu șase roți cu direcție Ackermann, care are o dinamică longitudinală și laterală cuplată, neliniară. Pornind de la primele principii ale vehiculului cu două axe, derivăm modelul matematic al vehiculului, pe care îl exprimăm apoi printr-o

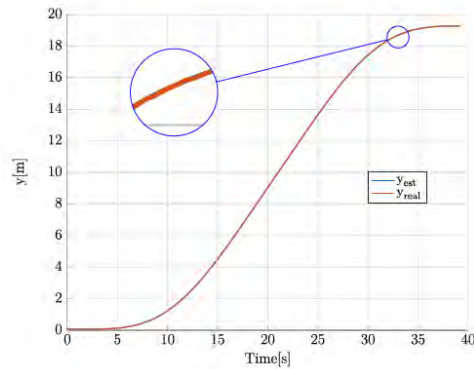
reprezentare cu ieșire plată. Folosind forma Brunovsky rezultată, oferim atât o estimare a poziției (prin DKF),

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\zeta}} &= A_c \hat{\zeta} + B_c v(\zeta, t) + K(\hat{\gamma} - \gamma), \\ \hat{\gamma} &= C_c \hat{\zeta},\end{aligned}$$

cât și un modul de control (o variantă de urmărire de referință). Modelul și blocurile sale auxiliare sunt testate în simulare pentru a valida consistența reprezentării plate și performanța acțiunilor de navigare și control. Schema de reglare propusă este un algoritm de tip PID, cu parametrii estimați/aleși astfel încât sistemul în buclă închisă să fie stabil și obiectivele reglării să fie atinse.



(a) x component



(b) y component

Fig. 3. DKF-estimated position vs. reference value.

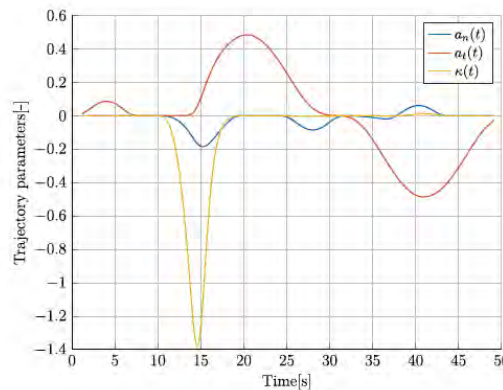


Fig. 4. Trajectory data.

[14] F. Chorobura, I. Necoara, J.C. Pesquet, An adaptive forward-backward-forward splitting algorithm for solving pseudo-monotone inclusions, provisionally accepted in Mathematics of Operations Research, 2025. – Activitate 1

În această lucrare, este propus un algoritm adaptiv de divizare înainte-înapoi-înainte pentru găsirea unui zero al unui operator pseudo-monoton, care este divizat ca o sumă a trei operatori: primul este continuu cu o singură valoare, al doilea este de tip Lipschitz, iar al treilea este maximal monoton. Această setare acoperă, în special, scenariile de minimizare constrânse, cum ar fi problemele cu constrângeri funcționale netede și convexe (de exemplu, programe pătratice constrânse pătratic) sau problemele cu o funcție obiectiv pseudo-convexă minimizată peste o mulțime convexă închisă simplă (de exemplu, programe pătratice peste programe fracționare liniare). Pentru problema generală, proiectăm o metodă de divizare înainte-înapoi-înainte bazată pe strategii adaptive noi de mărire a treptelor. Sub o proprietate Lipschitz generalizată suplimentară a primului operator, se calculează rata de convergență subliniară pentru secvența generată de algoritmul nostru adaptiv. Mai mult, dacă suma este uniform pseudo-monotonă, se obțin rate liniare/subliniare în funcție de parametrul pseudo-monotonității uniforme. Experimentele numerice preliminare demonstrează o performanță bună a metodei noastre în comparație cu unele metode și programe de optimizare existente.

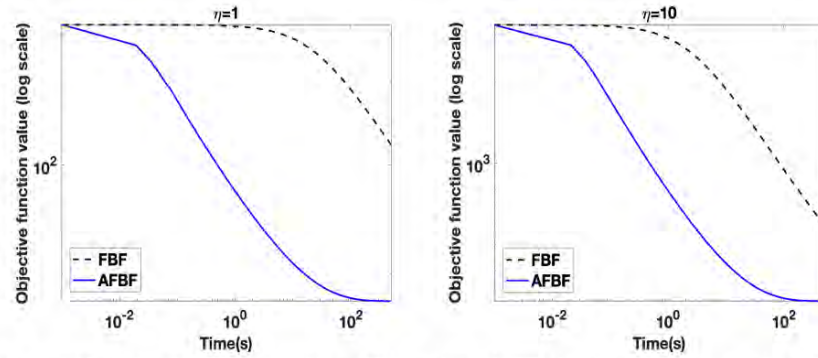


FIGURE 1. Evolution of Algorithm 1 in [37] (called here FBF) and our AFBF algorithm in function values along time for two linear fractional programs of the form (30) with data generated randomly, $\eta = 1$ and $\eta = 10$, and dimension $n = 10^6$.

Dataset (n, n_d)	m	TSA0	TSA	$\bar{\sigma}^2$	AFBF		TSENG		Gurobi	
					CPU	y^*	CPU	y^*	CPU	y^*
Ozone-level-8hr (2534, 72)	3	52.7	91.7	5.05	31.18	3.1	58.09	2.99	95.61	3
	5		91.7	2.575	49.9	5.04	61.38	5	339.88	5
mfeat-fourier (2000, 76)	3	87.7	89	5.05	11.82	3.04	21.5	2.99	40.56	3
	5		89	2.575	20.54	5.02	35.06	4.99	170.06	5
USPS (1424, 256)	3	60.2	91.5	10	4	3	5.23	3	232.98	3
	5		92.2	10	3.95	5	8.33	5	1106.7	5
isolet (600, 617)	3	57.5	95	10	0.59	3	1.35	3	10.8	3
	5		95.8	10	0.68	4.97	2.23	5	25.09	5
semeion (319, 256)	3	47.6	77.8	10	0.75	2.98	1.43	2.97	1.37	3
	5		84.1	10	0.89	5.02	3.19	4.99	4.12	5
Ovarian (253, 15154)	3	66	78	100	0.38	3.04	1.72	2.99	0.82	3
	5		88	100	0.47	4.96	2.48	4.99	2.31	5

TABLE 2. Comparison between our algorithm AFBF, Tseng's algorithm [39] and Gurobi solver [22] in terms of CPU time (in seconds) to solve QPQCs of the form (79) for various real datasets and two different choices of $m = 3, 5$. Additionally, TSA's are provided for (79) and (80).

[15] Ș. Sabău, A.I. Sperilă, C. Oară, A. Jadbabaie, **Sparse Representations of Dynamical Networks: A Coprime Factorization Approach**, accepted at **SIAM Journal on Control and Optimization**, 2025.

În această lucrare este studiată o clasă de rețele dinamice modelate prin sisteme liniare și invariante în timp, descrise prin realizări în spațiul stărilor. Pentru aceste rețele, investigăm relațiile dintre diferite tipuri de factorizări care păstrează structura interconectării subsistemelor componente. Procedând astfel, sunt oferite mijloace fezabile de comutare între diferite tipuri de reprezentări care păstrează raritatea și arătăm cum se pot utiliza aceste factorizări pentru a obține implementări distribuite pentru controlere stabilizatoare și, eventual, stabile. Prin formularea tuturor acestor rezultate atât pentru

sisteme în timp discret, cât și pentru sisteme în timp continuu, dezvoltăm implementări distribuite specializate care, până în acest moment, erau disponibile doar pentru rețele modelate ca sisteme în timp discret.

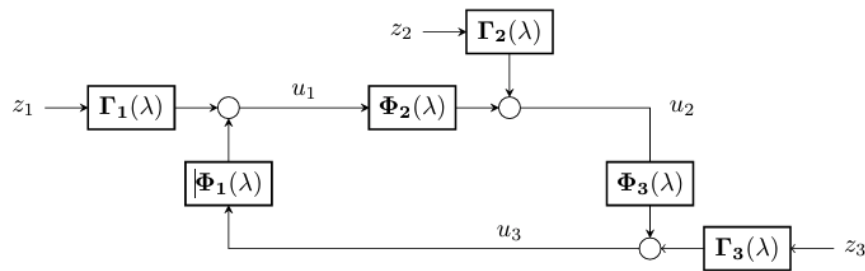


FIGURE 1. Three-hop network architecture

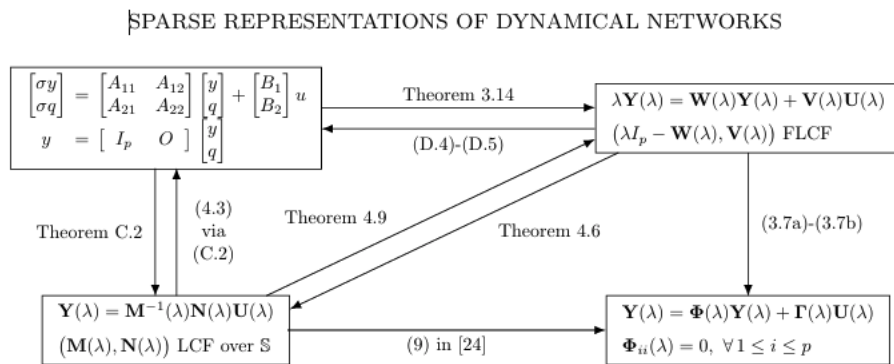


FIGURE 2. Diagram showing the means of switching between various LTI network representations

Activitatea 4 de diseminare și management a fost cu rezultate consistente de-a lungul întregii Etape 1, facilitând obținerea rezultatelor prezentate.

Îndeplinirea obiectivelor propuse

In această secțiune, prezentăm detalii cu privire la îndeplinirea obiectivelor propuse, prezentate la începutul raportului.

O1 Reducerea modelului de sisteme complexe din ecuații și/sau seturi de date măsurate: Au fost dezvoltați algoritmi de modelare de dimensiune redusă din date cu ajutorul formalismului matricelor generalizate Loewner, cu constrângeri.

O1.1 Evidențierea topologiei; îndeplinit prin alegerea structurii matricelor Loewner; reprezentarea rețelor de sisteme pentru planificarea mișcării (e.g., rețele de drone)

O1.2 Modelare redusă, foarte precisă, bazată pe date: modelele dinamice create cu ajutorul matricelor Loewner potrivesc exact datele frecvențiale de intrare/ieșire;

O1.3 Calculul dimensiunii și evaluarea complexității: alegerea cât mai bună a dimensiunilor modelelor aproximante este demonstrată prin intermediul simulărilor;

O1.4 Modele aproximante pentru control fiabil: modelele obținute pot fi scrise diverse reprezentări, atât ale sistemului, cât și a unor rețele de sisteme;

O1.5 Aproximare pentru reglare descentralizată: îndeplinit, deoarece cu ajutorul reprezentărilor în factorizări coprime, se scriu regulatoare descentralizate care formează o rețea cu aceeași topologie ca aceea a procesului care trebuie reglat.

O2 Control/reglare fiabile: îndeplinit, cu ajutorul unor algoritmi de reglare (des)centralizați

O.2.1 Modele pentru controlul fiabil al sistemelor de alimentare: îndeplinit, este dezvoltat un algoritm de reglare robustă de tip loopshaping, din date despre procesul de reglat, fără un model explicit al acestuia, care asigură teoretic atât stabilitatea nominală a buclei de reglare, cât și stabilitate și performanță robuste.

O.2.2 Control descentralizat LLQG: calculul reglatoarelor descentralizate pe reprezentări ale rețelelor; calcul reglatoare pentru formațiuni de UAV-uri pentru planificarea mișcării cu obstacole.

O3: Aplicație: Ecuația perturbată de propagarea undelor (Perturbed Wave PDE): sunt obținute rezultate bune în aproximarea finit dimensională din date în formalism Loewner.

O.3.1 Reducerea dimensională - aproximarea finit dimensională a PDE: rezultate obținute în definirea de modele finit dimensionale de dimensiuni reduse din date frecvențiale de intrare/ieșire culese.

O.3.2 Strategii de control a ecuației perturbate a undei: pornind de la aproximările finit dimensionale obținute la O3.1, metode de reglare de la O2 pot fi aplicate cu succes.

Raportarea lucrărilor pe activități propuse

Activitatea 1: Algoritmi de modelare cu dimensiuni reduse - reducere dimensională – {[1], [2], [5], [6], [7]}

1.1 Extragerea de informații din procesarea datelor – {[6], [8], [14]}

1.2 Extragerea topologiei rețelei de sisteme – {[2], [6]}

1.3 Reducerea dimensională pentru sinteza de regulator {[1], [5], [6], [7]}

Activitatea 2: Strategii de reglare fiabilă – {[3], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [12]}

2.1 Sinteza de reglare rezistentă la defecte – {[3], [4], [5], [6], [8], [9], [13]}

2.2 Sinteza de reglare descentralizată – {[15]}

Activitatea 3: Aplicație: ecuația perturbată de propagare a undei – {[11]}

3.1 Calculul aproximărilor liniare, finit-dimensionale – reducere dimensională – {[1], [2], [5], [11]}

3.2 Sinteza de reglare fiabilă la defecte și descentralizată – {[5], [6], [8], [9]}

Menționăm că, pentru Activitatea 3, în timpul desfășurării grantului au fost pregătite o lucrare cu tema de aproximare liniară finit dimensională a unui model de ecuație perturbată de propagare a undei, precum și o altă lucrare de aproximare eficientă a unui sistem de reglare automată a unui generator sincron de curent cu mărimi măsurate cu întârziere.

[S1] O.V. Iftime, T.C. Ionescu and D. Matignon. **Approximation of a Wave Model under Low-Order Dissipative Effects Using a Moment-Matching Technique**, trimisă spre publicare și prezentare la conferința IFAC World Congress, Coreea de Sud, 2026.

[S2] T.C. Ionescu, I. Necoara and O.V. Iftime. **Absolute stability preserving moment matching for Lur'e systems**, trimisă spre publicare și prezentare la European Control Conference (ECC2026), Islanda, 2026.

Activitatea 4: Managementul proiectului și diseminarea rezultatelor

4.1 Managementul proiectului

4.2 Diseminare în reviste Q1- Q3 și participări la conferințe – {[1]-[15]}

Contribuțiile fiecărui membru al echipei

În cele ce urmează, prezentăm echipa de cercetare a grantului, precum și contribuțiile științifice și de management aduse, indicând lucrările în care fiecare membru este (co)autor.

TUDOR C IONESCU – {[1], [2], [5], [6], [11]} & {[S1], [S2]} & Activitatea 4

ALEXANDRU DUMITRACHE – {[11]} & {[S1]} & Activitatea 4

ION NECOARĂ – {[1], [7], [14]} & {[S1]} & Activitatea 4.2

FLORIN STOICAN – {[3], [4], [8], [9], [10], [12], [13]} & Activitatea 4.2

ANDREI SPERILĂ – {[15]} & Activitatea 4.2

Tabel cu lucrările științifice ale grantului, pe etape

În această secțiune prezetăm un tabel care indică rezultatele cercetării, împărțite pe cele două etape:

Etapa 1 – 2024	Etapa 2 – 2024
Lucrări de conferință: [1], [2], [3], [4], [9], [10], [11], [8]	Lucrări de conferință: [5], [12] Lucrări de jurnal*: [6] (Q1**), [7] (Q1), [13] (Q2), [14] (Q1), [15] (Q1)

*indexate ISI

**conform JCR2024

Activități de logistică:

În prima etapă a fost achiziționat un instrument de calcul Apple 13-inch iPad Pro (M4) Cellular 512GB with Standard glass – Space Black, cu tastatură Apple Magic Keyboard for iPad Pro 13-inch (M4) - International English – White si cu Apple Pencil Pro, în valoare totală de 12073,74 de lei.

În cea de-a doua etapă, nu au mai fost efectuate achiziții, iar bugetul rămas la acest capitol a fost redirectionat la capitolul cheltuieli de deplasare, în limita impusă prin contract.

Deplasări (și legătura acestora cu activitatea proiectului

- A fost efectuat, începând cu 15 iunie 2024, un stagiu de lucru la Universitatea din Groningen, Prof. O. V. Iftime, timp de 30 de zile, conform Deciziei de deplasare Nr. 12 din 22.04.2024. Din proiectul de grant a fost decontată diurna pe 30 de zile în străinătate, suma forfetară în valoare de 5217,66 de lei.
- În perioada 11-17 Septembrie 2024, CS II Alexandru Dumitrache a participat pentru prezentarea lucrării „*Reduced Order Modeling for Aerodynamic and Flow Control - a brief Survey*”(coautor T.C. Ionescu) la conferința International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2024), Creta , în cadrul minisimpozionului „*Numerical Algorithms, Optimization Methods and Flow Control for Aerospace Techniques*”. Lucrarea a fost transmisă spre publicare la American Institute of Physics Conference Proceedings (indexat ISI).
Din proiectul de grant s-a decontat pentru această deplasare suma de 6441,84 de lei (cazare si diurna).
- De asemenea pentru lucrările [3], [4], [9], [10] se decontează cheltuieli de cazare si transport aferente participării la conferință: Conference on Decision and Control CDC2024, Milano IT.

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">- A fost efectuat, începând cu 26 iulie 2025, un stagiul de lucru la Universitatea din Groningen, Prof. O. V. Iftime, timp de 37 de zile, conform Deciziei de deplasare Nr. 6 din 08.04.2025. Din proiectul de grant au fost decontate cazarea și diurna pe 30 de zile în străinătate, suma forfetară în valoare de 23108 de lei. | |
|---|--|

Întocmit: Tudor C. Ionescu

Director proiect:

Tudor C. Ionescu.

Data

28/11/2025