



A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

CONTROL PREDICTIV MULTIVARIABIL AL UNUI ELICOPTER COAXIAL ÎN MINIATURĂ

Bogdan MUREȘAN, Ionuț MUNTEAN, Ruben CRIȘAN, Ioan NAȘCU

MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROL OF A MINIATURE COAXIAL HELICOPTER

In this paper two movements, strongly coupled, of a coaxial helicopter are controlled using a multivariable control algorithm. On such a helicopter four movements (yaw, altitude, pitch and roll) can be controlled with four actuators. Using models linearized around the hover position, for yaw and altitude, a multivariable control algorithm was developed. Further, some simulation results are presented and finally some advantages of using such a technique are emphasized.

Keywords: multivariable control, predictive control
Cuvinte cheie: control multivariabil, control predictiv

1. Introducere

Începând cu anii 80, datorită dezvoltării electronicii, a pachetelor de senzori inerțiali și a tehnologiei bazate pe computere, a fost posibilă construcția la scară mică a unor vehicule aeriene fără pilot care să fie capabile să zboare autonom. Printre cele mai complexe aparate de acest gen se află elicopterele. Acestea sunt sisteme multivariabile, puternic cuplate și neliniare [1]. În plus, elicopterele au abilitatea de a efectua manevre de zbor unice precum decolarea/aterizare pe verticală, planarea, slalomul sau piruetele. Datorită celor enumerate, identificarea, modelarea și controlul acestora au reprezentat provocări serioase în domeniul aeronautic în ultimii ani.

Algoritmii de control tradiționali folosiți pentru controlul aparatelor de zbor implică liniarizarea sistemului în jurul unor puncte de operare și proiectarea unor regulatoare liniare pentru fiecare situație, rezultând astfel o abordare de tipul gain-scheduling. Poate rezulta astfel, o lege de control care să nu posede global calitățile dorite, ci doar local de pe baza constituenților liniari [1]. Pentru a contracara deficiențele metodelor de control tradiționale au fost dezvoltate metode avansate de control. Multe dintre ele folosesc tot liniarizarea, dar se bazează pe algoritmi mai performanți cum ar fi controlul robust [2] sau controlul liniar pătratic Gaussian [3], care țin cont de incertitudinile rezultate în urma liniarizării și a dinamicilor nemodelate. Algoritmii de control dezvoltat în această lucrare este un control predictiv multivariabil bazat, de asemenea, pe modele liniare.

2. Elicopterul coaxial

Elicopterul coaxial (figura 1) are două rotoare principale și prezintă unele avantaje față de tipul clasic (cu un rotor în coadă): este mai stabil și mai ușor de manevrat în zbor, este mai compact și poate ridica o încărcătură mai mare cu aceeași putere a motoarelor.



Fig. 1

Elicopterul coaxial
în miniatură

Cele două rotoare sunt acționate de două motoare de curent continuu fără perii și se rotesc în direcții opuse, generând astfel o pereche de cupluri de direcții opuse. Pentru ca elicopterul să aibă o poziție constantă și stabilă în zbor trebuie ca cele două cupluri rezultate să fie egale, astfel încât să se anuleze reciproc. Acest lucru face posibil controlul mișcării de rotație yaw (pe axa Z) modificând diferența vitezelor celor două rotoare, dar și altitudinea prin modificarea sumei vitezelor de această dată. Rezultă o cuplare puternică între cele două mișcări pe axa Z (de rotație și translație), iar acest lucru trebuie luat în considerare la proiectarea regulatorului. Pentru a obține un cuplu mai mare viteza motoarelor este redusă folosind o cutie de viteze. Axul

central conține un mecanism numit „swash-plate” care permite controlul mișcărilor de rotație pe axa X („roll”), respectiv Y („pitch”), fiind acționat de două servomotoare. Toate motoarele sunt alimentate de o baterie litiu-polimer. La capătul de sus al axului central este montată o bară de stabilizare („flybar”). Suplimentar, pentru a obține poziția și orientarea elicopterului este nevoie de o unitate de măsură inerțială care conține mai mulți senzori și care este montată la bordul elicopterului.

În figura 2 este prezentată schema Simulink a modelului MIMO al elicopterului. Funcțiile de transfer au fost obținute din [4].

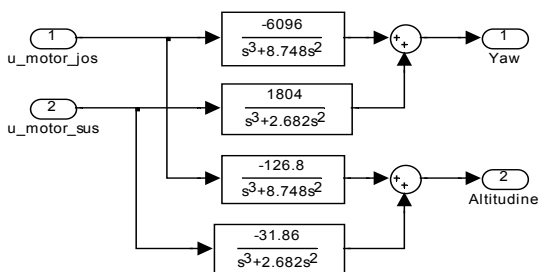


Fig. 2

Modelul
MIMO
al
elicopterului

3. Control predictiv multivariabil

Pentru a controla elicopterul autorii au ales un algoritm de Control auto-adaptiv cu predicție extinsă (EPSAC – Extend Prediction Self Adaptive Control) propus de De Keyser și Van Cauwenbergh în [5].

Pentru un sistem multivariabil (MIMO - Multiple Input Multiple Output) 2x2, vectorul semnalului de control este calculat pe baza unei funcții de cost:

$$\begin{aligned}
 J(\Delta u_1, \Delta u_2) = & \sum_{k=N_{11}}^{N_{21}} [r_1(t+k) - y_1(t+k/t)]^2 + \\
 & + \sum_{k=N_{12}}^{N_{22}} [r_2(t+k) - y_2(t+k/t)]^2 + \\
 & + \lambda \left[\sum_{k=0}^{N_{u1}-1} [\Delta u_1(t+k/t)]^2 + \sum_{k=0}^{N_{u2}-1} [\Delta u_2(t+k/t)]^2 \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

unde N_{21}, N_{22} sunt orizonturile maxime de predicție, N_{11}, N_{12} sunt orizonturile minime de predicție, N_{u1}, N_{u2} sunt orizonturile de control,

λ este parametrul de ponderare, în timp ce $r_i(t+k/t), i=1,2$ reprezintă traiectoriile de referință precise, corespunzătoare fiecărei ieșiri.

Pentru a calcula funcția de cost la fiecare moment de timp t , sunt necesare răspunsurile viitoare $y_1(t+k/t)$, respectiv $y_2(t+k/t)$ precise pe k pași înainte. Aceste răspunsuri viitoare, sunt considerate a fi rezultatele cumulate a două efecte:

$$y_i(t+k/t) = y_{base_i}(t+k/t) + y_{optimize_i}(t+k/t) \quad (2)$$

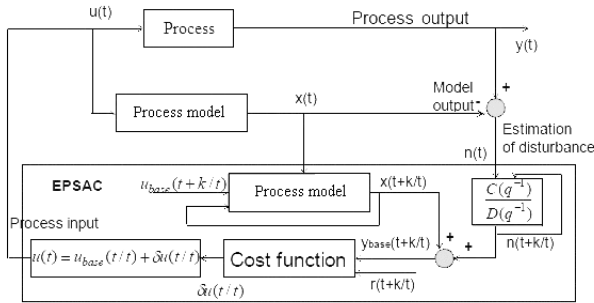


Fig. 3 Schema de control predictiv

Componenta $y_{base_i}(t+k/t)$ este rezultatul cumulativ al: secvențelor de control anterioare $\{u(t-1), u(t-2), \dots\}$, efectul unui scenariu de control viitor numit $u_{base_i}(t+k/t) = [u_{base_1}(t+k/t) \ u_{base_2}(t+k/t)]^T, k \geq 0$ care este definit apriori și efectul unor perturbații viitoare $n_i(t+k/t)$.

Bucula de control predictiv este dată în figura 3. Vectorul $y_{base}(t+k/t) = [y_{base_1}(t+k/t) \ y_{base_2}(t+k/t)]^T$ este obținut folosind tehnici de filtrare și predicția ieșirii procesului pe baza modelului acestuia. La fiecare moment de timp t , controlerul EPSAC compară vectorul de ieșire al procesului $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ cu vectorul de ieșire al modelului $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$, rezultând vectorul

perturbațiilor $n(t) = [n_1(t) \ n_2(t)]^T$. Abordarea EPSAC presupune folosirea unui filtru de forma $C(q^{-1})/D(q^{-1})$ pentru predicția perturbației corespunzătoare fiecărei ieșiri, pe un orizont de timp $n_i(t+k/t)$ (Fig. 3). Predicția răspunsului procesului fără zgomot, $x_i(t+k/t)$, este obținut simulând modelul procesului, luând vectorul de bază al intrărilor $u_{base}(t+k/t)$ ca și intrare a modelului: $u(t+k/t) = u_{base}(t+k/t)$. Vectorul de ieșire final y_{base} , prezis pe k pași, este obținut adunând $x(t+k/t)$ și $n(t+k/t)$.

Componenta $y_{optimize_i}(t+k/t)$ este efectul semnalelor de control viitoare aplicate procesului $\delta u_1(t/t), \delta u_1(t+1/t), \dots, \delta u_1(t+N_{u_1}-1/t), \delta u_2(t/t), \delta u_2(t+1/t), \dots, \delta u_2(t+N_{u_2}-1/t)$, cu $\delta u_i(t+k/t) = u_i(t+k/t) - u_{base_i}(t+k/t)$ și poate fi scris ca:

$$\begin{aligned}
 y_{optimize_i}(t+k/t) = & h_{k_1} \delta u_1(t/t) + h_{k_1-1} \delta u_1(t+1/t) + \dots \\
 & \dots + g_{k_1-N_{u_1}+1} \delta u_1(t+N_{u_1}-1/t) + \dots \\
 & \dots + h_{k_2} \delta u_2(t/t) + h_{k_2-1} \delta u_2(t+1/t) + \dots \\
 & \dots + g_{k_2-N_{u_2}+1} \delta u_2(t+N_{u_2}-1/t)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Parametrii $h_{1_i}, h_{2_i}, \dots, h_{k_i}, \dots, h_{N_{2_i}}, i = 1, 2$ sunt coeficienții răspunsului sistemului 2×2 la un impuls unitate, în timp ce coeficienții răspunsului la treaptă sunt notați g_{k_i} . Folosind notații matriceale, se obține ecuația cheie a strategiei de control MBPC:

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \bar{Y}_1 + G_{11} \cdot U_1 + G_{12} \cdot U_2 \\
 Y_2 &= \bar{Y}_2 + G_{21} \cdot U_1 + G_{22} \cdot U_2
 \end{aligned} \tag{4}$$

Se definesc matricile $G_1 = [G_{11} \ G_{12}]$ și $G_2 = [G_{21} \ G_{22}]$

și vectorul $U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$. Cu aceste notații, funcția de cost devine:

$$J = \left[(R_1 - \bar{Y}_1) - G_1 U \right]^T \left[(R_1 - \bar{Y}_1) - G_1 U \right] + \left[(R_2 - \bar{Y}_2) - G_2 U \right]^T \left[(R_2 - \bar{Y}_2) - G_2 U \right] + \lambda U^T U \quad (5)$$

care după minimizarea în funcție de U devine:

$$U^* = -H^{-1}f$$

$$H = G_1^T G_1 + G_2^T G_2 + \lambda I \quad (6)$$

$$f = -\left[G_1^T (R_1 - \bar{Y}_1) + G_2^T (R_2 - \bar{Y}_2) \right]$$

Astfel, acțiunea de control aplicată procesului la momentul actual este:

$$u(t) = u_{base}(t-1) + U_i^*(1), i = 1, 2 \quad (7)$$

4. Rezultate

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost obținute scalând semnalele de intrare-ieșire astfel încât poziția de planare a elicopterului să corespundă nivelului zero al semnalelor.

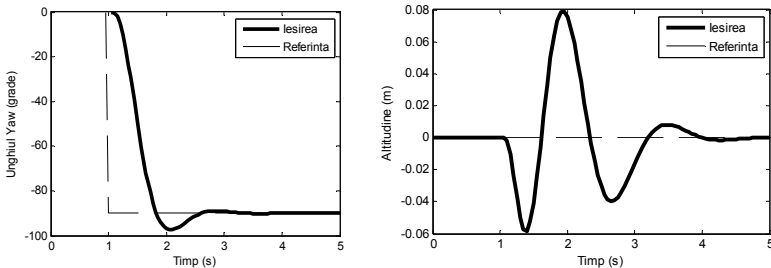


Fig. 4 Răspunsul în buclă închisă pentru o treaptă aplicată yaw

Figura 4 prezintă rezultatele obținute pentru o referință de tip treaptă (o rotație pe axa Z de 90°), în timp ce altitudinea este ținută constantă. Perioada de eșantionare a controlerului este de 0,05 secunde. Rezultatele prezentate în figurile 4, și 5 au fost obținute pentru următoarele valori ale parametrilor de proiectare: $N_{11} = N_{12} = 1$, $N_{21} = N_{22} = 10$ și $N_u = 1$. După cum se poate observa, controlerul

reuşeşte să urmărească referinţa în mai puțin de trei secunde, dar cu un suprareglaj de aproximativ 10 %. Poziţia pe verticală este afectată nesemnificativ (câţiva cm).

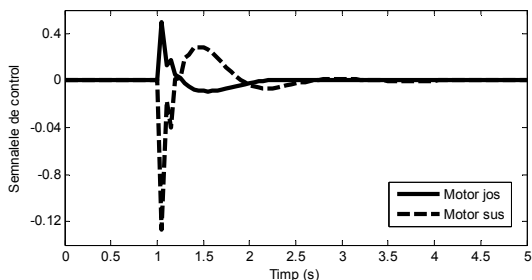


Fig. 5 Semnalele de control in cazul aplicării unei trepte pentru yaw

În figura 5 apar cele două semnale de control aplicate motoarelor. Se poate observa că în cazul de față, efortul de control necesar pentru rotirea cu 90° a elicopterului este relativ mic.

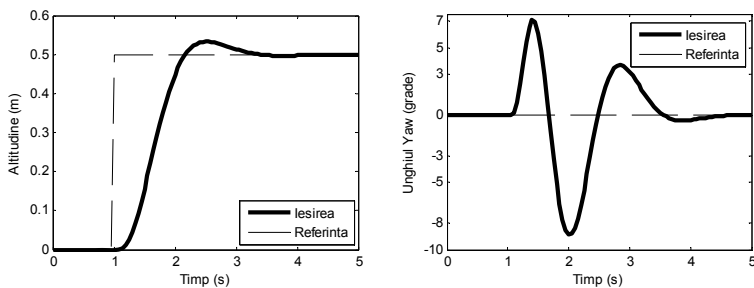


Fig. 6 Răspunsul în buclă închisă pentru o treaptă aplicată altitudinii

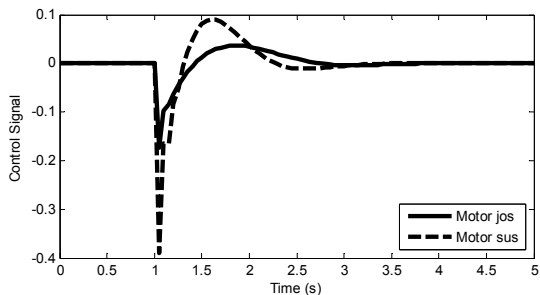


Fig. 7 Semnalele de control în cazul aplicării unei trepte altitudinii

Pentru următorul scenariu, o treapta de 0,5 m a fost aplicată ca și referință în cazul altitudinii, în timp ce yaw este menținută constantă. Rezultatele sunt prezentate în figura 6 și 7 fiind obținute pentru: $N_{11} = N_{12} = 1$, $N_{21} = 9$, $N_{22} = 14$ și $N_u = 1$ și 0,05 perioada de eșantionare a controlerului. În prima figură se poate observa că altitudinea crește cu o jumătate de metru în aproximativ 4 secunde, cu un suprareglaj foarte mic. Observăm în figura 6 dreapta, că, rotația pe axa Z variază în domeniul $[-9; 7]^\circ$. În acest caz efortul de control este mai mare (figura 7).

5. Concluzii

■ A fost prezentat controlul unui elicopter coaxial folosind un algoritm predictiv multivariabil. Acesta prezintă avantajul că modificând parametrii de proiectare se pot ajusta performanțele în buclă închisă.

■ Răspunsul este mai rapid, față de un controler robust de exemplu [2], datorită faptului că poate ține cont de o viitoare modificare a referinței înainte ca aceasta să se producă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Calise, A.J., Rysdyk, R.T., *Nonlinear adaptive flight control using neural networks*, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 18(6) /1998, pag. 14-25.
- [2] Schafroth, D., Bermes, C., Bouabdallah, S., Siegwart, R., *Modeling, system identification and robust control of a coaxial microhelicopter*, Control Engineering Practice, Vol. 18/2010, pag. 700-711.
- [3] Zhao, L., Murthy, V.R., *Optimal controller for an autonomous helicopter in hovering and forward flight*, 2009.
- [4] Schafroth, D., Bouabdallah, S., Bermes, C., Siegwart, R., *Modeling and System Identification of the muFly Helicopter*, În: Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 57/2009, pag. 27-47.
- [5] De Keyser, R.M.C., Van Cauwenberghe, A.R., *Extended prediction self-adaptive control*, În: IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, York, UK, 1985, pag. 1225-1260.

Drd.Ing. Bogdan MUREȘAN, membru AGIR

Drd.Ing. Ionuț MUNTEAN, membru AGIR

Drd.Ing. Ruben CRIȘAN

Prof.Dr. Ioan NAȘCU

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Email: bogdan.muresan@aut.utcluj.ro