

Տ.Ա. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

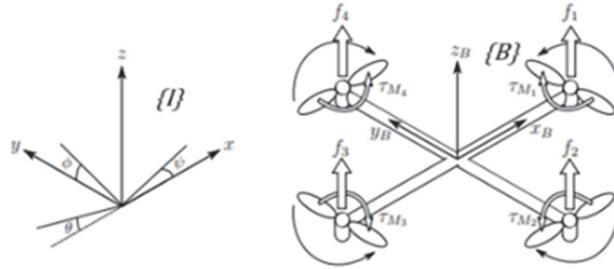
**ԱՆՕԴԱԶՈՒ ԹՈՂՈՂ ՍԱՐՔԻ ՎՐԱ ՏԵՂԱԴՐՎԱԾ ՇՐՋՎԱԾ ՃՈՃԱՆԱԿԻ
ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ**

Նախագծվել է անօդաչու թռչող սարքի (ԱԹՍ) վրա տեղադրված շրջված ճոճանակի կառավարման համակարգ՝ օգտագործելով գծային քառակուսային կարգավորիչ: Matlab ծրագրային ապահովման միջավայրում իրականացվել է կարգավորիչի պարամետրերի նախագծում: Ստացված կարգավորիչն օգտագործվել է իրական պայմաններում փորձի կատարման համար: Մշակվել է կառավարման ալգորիթմ՝ օգտագործելով Vicon շարժումը գրանցող համակարգը:

Առանցքային բառեր. կառավարման համակարգ, անօդաչու թռչող սարք, շրջված ճոճանակ, գծային քառակուսային կարգավորիչ:

Ներածություն: Անօդաչու թռչող սարքի (ԱԹՍ) վրա շրջված ճոճանակի խնդիրը զգալի ուշադրություն է գրավել վերջին տարիներին՝ որպես կառավարման բարդ խնդիր, որը համատեղում է ճոճանակի և թռչող դրոնի դինամիկաները: Որոշ աշխատություններում ուսումնասիրվել է այս խնդիրը կառավարման տարբեր եղանակների կիրառմամբ, ինչպիսիք են դասական մեթոդները [1], նեյրոնային ցանցերով կառավարումը [2] և այլն: Սակայն միշտ չէ, որ նախագծված կառավարման համակարգի վարքը համապատասխանում է իրական պայմաններում կատարված փորձի արդյունքներին: Ելնելով վերոնշյալից, աշխատանքում մշակվել է կառավարման ալգորիթմ, որը հնարավորություն է տալիս իրական պայմաններում շրջված ճոճանակը հավասարակշռել ԱԹՍ-ի վրա՝ ուղղահայաց դիրքում: Որպես հետադարձ կապ օգտագործվել է Vicon շարժումը գրանցող համակարգը: ԱԹՍ-ին հրամանների ուղարկումը կատարվել է Python և Mavlink ծրագրերի կիրառմամբ: Ուսումնասիրությունները կատարվել են քառապտուտակ տեսակի ԱԹՍ-ով՝ իր պարզության և հարմարավետության պայմաններից ելնելով:

Համակարգի դինամիկ նկարագիրը: Քառապտուտակի վրա շրջված ճոճանակի դինամիկական մոդելը հիմնական բաղադրիչն է՝ համակարգի վարքագիծը հասկանալու և կառավարման համակարգի մշակման համար: Դիտարկվող համակարգի դինամիկական մոդելը բաղկացած է երկու հիմնական մասից. Քառապտուտակի դինամիկա և ճոճանակի դինամիկա: Քառապտուտակի դինամիկական նկարագրվում է $\{I\}$ իներցիալ և $\{B\}$ բազային կոորդինատային համակարգերի միջոցով (նկ. 1):



Նկ. 1. Քառապտուտակի սխեմատիկական կառուցվածքը

Որպես բազային կորդինատային հարթության սկզբնակետ ընտրվել է քառապտուտակի ծանրությունների կենտրոնը՝ համապատասխանաբար x_B, y_B, z_B առանցքներով, որոնք ուղղված են իներցիալ կորդինատային հարթության առանցքներին զուգահեռ: $\{I\}$ կորդինատային հարթությունից անցումը $\{B\}$ -ի բնութագրվում է համապատասխանաբար X, Y, Z էլիբերի ψ (ընթացաշեղում), ϕ (կողաթեքում) և θ (երկայնաճոճում) պտույտների անկյուններով, ինչը ներկայացվում է R օրթոգոնալ մատրիցի միջոցով [3].

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta - \sin\phi \sin\psi \sin\theta & -\cos\phi \sin\psi & \cos\psi \sin\theta + \cos\theta \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi + \cos\psi \sin\phi \sin\theta & \cos\phi \cos\psi & \sin\psi \sin\theta - \cos\psi \cos\theta \sin\phi \\ -\cos\phi \sin\theta & \sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}: \quad (1)$$

Հաշվի առնելով (1)-ը, քառապտուտակի ուղղաձիգ արագացումները երեք առանցքներով ներկայացվում են (2) հավասարումով՝

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

որտեղ F -ը քառապտուտակի գումարային քարշիչ ուժն է: Էլիբերի անկյունների կախումը քառապտուտակի բազային կորդինատներում անկյունային արագություններից կարող ենք ներկայացնել՝

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \cos\theta \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ -\sin\theta & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

որտեղ w_x, w_y, w_z -ը բազային առանցք-ի շուրջ պտտման արագություններն են:

Ճոճանակն ունի ազատության երկու աստիճան, որոնք նկարագրվում են ճոճանակի զանգվածների կենտրոնի ուղղաձիգ p_x, p_y տեղափոխություններով O հիմքի նկատմամբ (p_x -ը x առանցքի երկայնքով, p_y -ը y առանցքի երկայնքով):

Պարզության համար նկարագրենք ճոճանակի հարաբերական դիրքը z առանցքի երկայնքով որպես.

$$p_z := \sqrt{L^2 - p_x^2 - p_y^2}, \quad (4)$$

որտեղ L -ը ճոճանակի հիմքից մինչև զանգվածների կենտրոն եղած հեռավորությունն է:

Ճոճանակի ոչ գծային դինամիկ հավասարումները ներկայացվել են՝ օգտագործելով դասական Լագրանժյան մեխանիկան, որը հանգեցնում է հետևյալ ոչ գծային հավասարումներ համակարգի.

$$\begin{bmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_y \end{bmatrix} = f(r, s, \dot{r}, \dot{s}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}): \quad (5)$$

Քանի որ ճոճանակի զանգվածը քառապտուտակի զանգվածի համեմատ շատ փոքր է, ենթադրվել է, որ ճոճանակի ուժերը քառապտուտակի վրա աննշան են, և քառապտուտակի դինամիկան կախված չէ ճոճանակից:

Համակցված համակարգի դինամիկան ամբողջապես ներկայացվել է՝ օգտվելով (2), (3) և (5) հավասարումներից՝ [4]-ի համաձայն, այնուհետև գծայնացվել են փոքր շեղումների համար Թեյլորի շարքի միջոցով (փոքր շեղումները նշված են Δ -ով, Δx , Δr և այլն): Համարելով հաստատուն նոմինալ պայմաններ և գրոյական ընթացաշեղման անկյուն, քառապտուտակի երեք ուղղաձիգ ազատության աստիճաններն ամբողջապես կապագերծվում են երեք առանցքների երկայնքով՝

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{p}_x &= \Delta p_x \frac{g}{L} - \Delta \phi g, \Delta \ddot{p}_y = \Delta p_y \frac{g}{L} + \Delta \theta g, \\ \Delta \ddot{x} &= \Delta \phi g, \Delta \ddot{y} = -\Delta \theta g, \Delta \ddot{z} = \Delta F, \\ \Delta \dot{\phi} &= \Delta w_x, \Delta \dot{\theta} = \Delta w_y: \end{aligned} \quad (6)$$

Գծային-քառակուսային կարգավորիչ: Գծային-քառակուսային կարգավորիչը (LQR) նպատակ ունի մինիմալի հասցնել քառակուսային ծախսի ֆունկցիան.

$$C = \int_{t=0}^{t=\infty} (X^T(t) Q X(t) + U^T R U(t)) dt, \quad (7)$$

որտեղ k ուժեղացման գործակիցն այնպիսին է, որ՝ $U(t) = -kX(t)$, t -ն ժամանակն է, Q և R -ը կշռման (weighting) դրական մատրիցներ են:

Գծային-քառակուսային կարգավորիչ նախագծելու համար կարևոր է համապատասխան Q , R կշռման անկյունագծային մատրիցների ընտրությունը: (6)-ի հիման վրա կառուցվել է համակարգի վիճակի տարածության մոդելը (state-

space model), և Matlab ծրագրային հավելվածի միջոցով նախագծվել է գծային-քառակուսային կարգավորիչ:

Քանի որ հորիզոնական x , y ուղղություններով խնդրի կառավարումը նույնատիպ է, ուսումնասիրությունը ներկայացված է միայն մեկ առանցքի վրա: Համակարգի նոմինալ արժեքների նկատմամբ գծայնացված վիճակի տարածության մոդելը y առանցքով կլինի՝

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_y \\ \dot{p}_y \\ y \\ \dot{y} \\ \theta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} p_y \\ \dot{p}_y \\ y \\ \dot{y} \\ \theta \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ներմուծելով վիճակի մատրիցները (8) Matlab հավելված՝ նախագծվել են Q և R անկյունագծային մատրիցները: Այնուհետև K գործակիցը, հաշվելով Matlab-ի պարզ հրամանով՝ $k = \text{lqr}(A, B, Q, R)$, ստացվել է՝

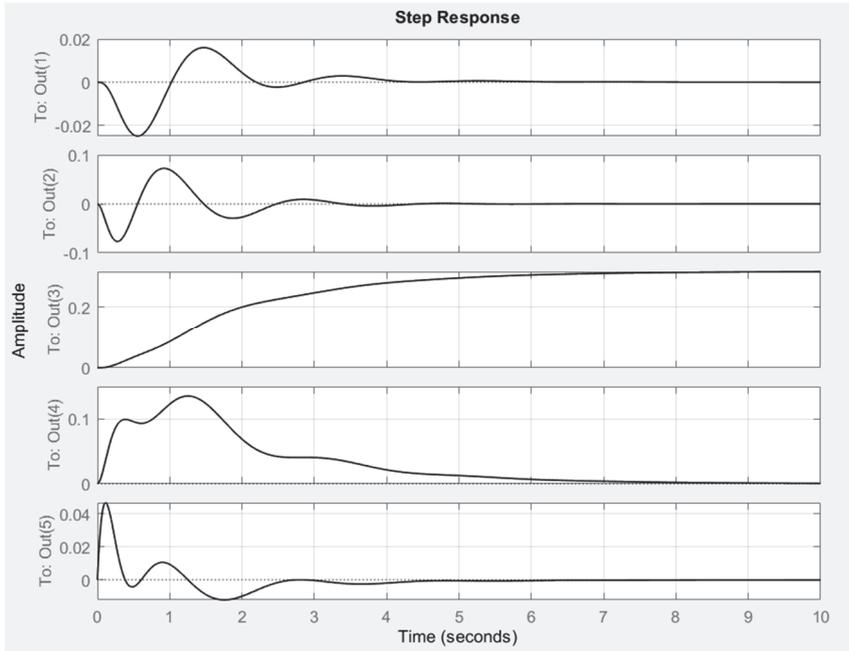
$$K_{x,y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -27.1 & -11.1 & 10.7 & 23.6 & 11.4 \end{bmatrix} :$$

Նկ. 2-ում ներկայացված են համակարգի անցողիկ կորերը՝ նախագծված գծային-քառակուսային կարգավորիչով: Անցողիկ կորերը համապատասխանում են y առանցքի նկատմամբ համակարգի բոլոր 5 վիճակի փոփոխականներին՝ ճոճանակի դիրք, ճոճանակի արագություն, քառապտուտակի դիրք, արագություն և պտտման անկյուն:

Աղյուսակ

	$t_{կար}$	σ	μ
p_y	0,73 վ	25 %	1.7

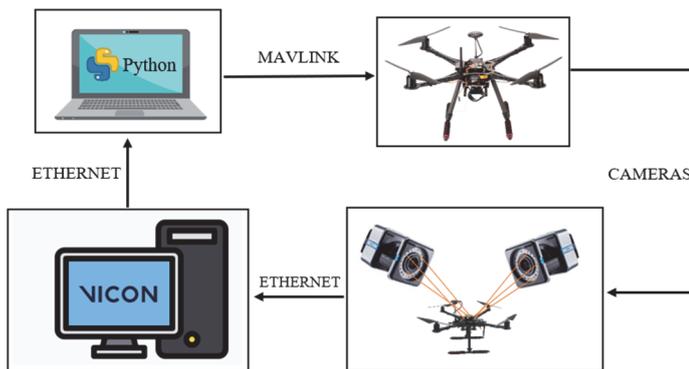
Աղյուսակում ներկայացված են ճոճանակի դիրքի $t_{կար}$ կարգավորման ժամանակը, σ գերկարգավորումը և μ մարման դեկրեմենտը: Թույլատրելի սխալը ընդունվել է $\Delta=0.02$ մ:



Նկ. 2. Համակարգի անցողիկ կորերը y առանցքով

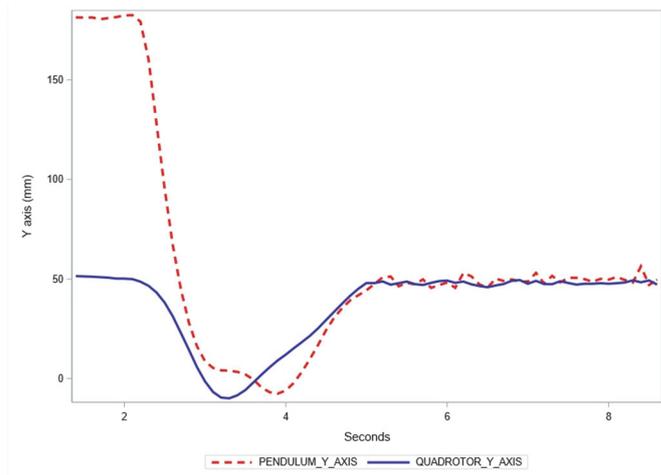
Փորձի արդյունքները: Համակարգի վիճակների կոորդինատները իրական ռեժիմում գրանցելու համար օգտագործվել է VICON շարժումը գրանցող համակարգը (նկ. 3): Շարժումը գրանցող համակարգից տվյալների ստացումը կատարվել է Vicon DataStream Software Development Kit (VICON SDK) Protocol-ի միջոցով [5]:

Տվյալների մշակումը և քառապտուտակին կառավարման ազդանշանների ուղարկումը կատարվել է Python և MAVLink ծրագրերի միջոցով:



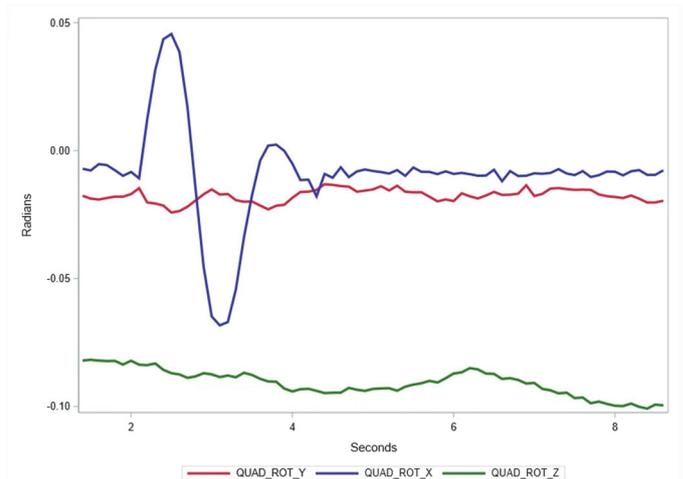
Նկ. 3. Համակարգի կառավարման գործիքների միջև կապը

Փորձի արդյունքները ներկայացված են գրաֆիկների տեսքով: Նկ. 4-ում պատկերված է ճոճանակի և քառապտուտակի y առանցքի կոորդինատների կախումը ժամանակից (կառավարման հրահանգը տրվում է 2-րդ վայրկյանին): Քառապտուտակը անկյունային արագացման շնորհիվ ճոճանակին տալիս է ուղղահայաց դիրք և շարունակում պահել այն հավասարակշիռ դիրքում:



Նկ. 4. Ճոճանակի (կարմիր) և քառապտուտակի (կապույտ) կոորդինատները

Նկ. 5-ում քառապտուտակի անկյունային շեղումներն են կառավարումն իրականացնելու ժամանակ՝ արտահայտված ռադիաններով:



Նկ. 5. Քառապտուտակի X(կապույտ), Y(կարմիր), Z(կանաչ) անկյան շեղումները կառավարման ընթացքում

Եզրակացություն: Ուսումնասիրվել է բարդ համակարգի կառավարման մոդել, որը բաղկացած է շրջված ճոճանակից և քառապտուտակ տեսակի անօդաչու թռչող սարքից: Matlab ծրագրային փաթեթի միջոցով ընտրվել է կարգավորիչ: Նախագծվել է կառավարման ալգորիթմ Python և MavLink գործիքների միջոցով, օգտագործելով Vicon շարժումը գրանցող համակարգը՝ որպես հետադարձ կապ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Qian Q., Dongmei D., Feng L., Yongchuan T.** Stabilization of the double inverted pendulum based on discrete-time model predictive control // (ICAL) IEEE International Conference. -2011, August. -P. 243-247.
2. **Williams V., Matsuoka K.** Learning to balance the inverted pendulum using neural networks // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. -1991. -P. 214–2-19.
3. **Gasparyan O.N., Simonyan T.A.** Control of quadcopters based on feedback linearization // ISSN 1829-0045 Proceedings of Engineering of Academy of Armenia (PEAA). -2022. -V.19, N 1. -P. 91-97.
4. **Hehn M., D’Andrea R.** A Flying Inverted Pendulum // IEEE International Conference on Robotics and Automation. -Shanghai, China, 2011. -P.763-770.
5. Vicon DataStream SDK Guide, link: <https://www.vicon.com/software/datastream-sdk/>

Т.А. СИМОНЯН

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАТНЫМ МАЯТНИКОМ НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Разработана система управления обратным маятником на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) с использованием линейно-квадратичного регулятора. В программной среде Matlab был спроектирован и настроен регулятор. Настроенный контроллер использовался для эксперимента в реальных условиях. Разработан алгоритм управления с использованием системы захвата движения Vicon.

Ключевые слова: система управления, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), обратный маятник, линейно-квадратичный регулятор.

Т.А. SIMONYAN

CONTROLLING THE INVERTED PENDULUM ATOP OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

A control system was designed for an inverted pendulum atop of a UAV using a linear quadratic regulator. The regulator was designed and tuned using the Matlab software. The tuned controller was used for the experiment in real conditions. A control algorithm was developed using the Vicon motion capture system.

Keywords: control system, unmanned aerial vehicle, inverted pendulum, linear-quadratic regulator.