

## Điều khiển thích nghi quadrotor với các tham số bất định

Nguyễn Việt Phương<sup>1</sup>, Nguyễn Duy Khánh<sup>2</sup>, Hồ Công Quốc<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;

<sup>2</sup>Đại học kỹ thuật Điện Xanh Petecbua (LETI);

<sup>3</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự.

\*Email: quochv99@gmail.com

Nhận bài: 04/8/2023; Hoàn thiện: 16/10/2023; Chấp nhận đăng: 24/10/2023; Xuất bản: 25/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.92.2023.30-37>

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả tổng hợp luật điều khiển bám vị trí và ổn định cho thiết bị bay không người lái (UAV) dạng quadrotor, sử dụng thuật toán điều khiển thích nghi gradient tốc độ thích ứng với sự thay đổi bất định của các tham số. Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/SIMULINK với mô hình quadrotor giả định chứng minh khi sử dụng bộ điều khiển thích nghi sẽ giúp quadrotor hoạt động một cách ổn định bám theo quỹ đạo bay trong trường hợp bất định các tham số của quadrotor.

**Từ khóa:** Thiết bị bay; Quadrotor; Gradient tốc độ; Điều khiển thích nghi; Tham số bất định.

### 1. MỞ ĐẦU

Thiết bị bay không người lái (UAV) là loại máy bay có thể được điều khiển từ xa thông qua hệ thống điều khiển dưới mặt đất hoặc hoàn toàn tự động bằng hệ thống máy tính gắn trên máy bay. Trong số các UAV, quadrotor là loại máy bay có khả năng cất hạ cánh thẳng đứng mà không cần đường băng. Mặc dù hệ thống điều khiển phức tạp nhưng chúng có cấu trúc đơn giản dễ chế tạo và điều khiển, đặc biệt có chi phí thấp. Ngày nay, nó được sử dụng rất rộng rãi trong quân sự và mở rộng ra các lĩnh vực dân sự. Trong dân sự UAV có các ứng dụng như giải trí (quay phim, chụp ảnh) và giám sát, chữa cháy,... Trong quân sự, UAV được sử dụng để xác định lực lượng đối phương, bảo vệ cảng và bờ biển, tìm kiếm, cứu hộ, cứu nạn trên mặt đất, mặt biển, giám sát, phát hiện bom mìn, thông tin tình báo, xác định hệ thống radar, hay thậm chí được sử dụng như là vũ khí tấn công [1-3]...

Trong các nghiên cứu [4, 5] các tác giả đã mô hình hóa quadrotor dựa trên các định luật Newton. Điểm chung thuật toán điều khiển của các nghiên cứu trên là sử dụng 2 vòng điều khiển PID để điều khiển bám vị trí và ổn định tư thế cho quadrotor.

Trong nghiên cứu của Abhijit Das và đồng nghiệp [6], các tác giả đã tiến hành nghiên cứu điều khiển ổn định quadrotor bằng thuật toán điều khiển backstepping. Trong mô hình này, động học của quadrotor đã được đơn giản hóa theo mẫu của trục thẳng.

Trong nghiên cứu [7], Pedro O. đã xây dựng mô hình tuyến tính hóa của quadrotor. Tác giả sử dụng thuật toán LQR, bộ lọc Kalman và dữ liệu cảm biến để ước lượng khối lượng và quán tính của tải ngoài nhằm điều khiển quadrotor trong điều kiện tải ngoài thay đổi.

Trong các nghiên cứu trên, việc sử dụng bộ điều khiển PID là phổ biến nhất, bởi tính chất đơn giản và dễ thực hiện. Tuy nhiên, do cấu trúc điều khiển quá đơn giản nên chất lượng điều khiển không cao và có thể gây mất ổn định khi các tham số hệ thống thay đổi. Còn các thuật toán backstepping hay LQR, sử dụng cần phải đơn giản hóa mô hình. Ngoài ra, tính bền vững của các thuật toán này không cao trong điều kiện bất định tham số.

Trong công trình của Trong-Toan Tran cùng các đồng nghiệp [8], các tác giả đã xây dựng mô hình toán học quadrotor dưới dạng phương trình Euler-Lagrange và biến đổi mô hình toán học thành dạng tham số hóa tuyến tính (affine). Nhóm tác giả đã sử dụng thuật toán thích nghi kết hợp toán tử chiếu để điều khiển ổn định quadrotor trong điều kiện ràng buộc tín hiệu đầu vào và

các tham số bất định của mô hình.

Qi Han và các đồng nghiệp trong nghiên cứu [9] sử dụng thuật toán thích nghi I&I và phương pháp hàm Lyapunov để giải quyết vấn đề điều khiển quadrotor trong điều kiện tham số không chắc chắn và lỗi thiết bị truyền động.

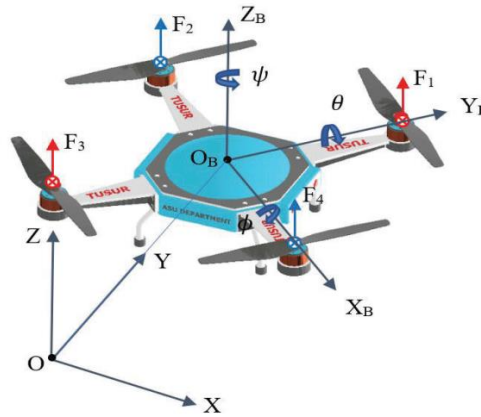
Các phương pháp thích nghi trên, mặc dù cung cấp chất lượng điều khiển tốt nhưng việc tổng hợp phức tạp và cần phải đưa mô hình toán học quadrotor dạng phương trình Euler-Lagrange về dạng affine cách ly tham số chưa biết, điều mà cũng gây phức tạp trong việc triển khai khảo sát với đối tượng phi tuyến phức tạp bậc cao.

Trong bài báo này, các tác giả đưa ra áp dụng thuật toán thích nghi gradient tốc độ để đánh giá khả năng đáp ứng và hiệu quả trong điều khiển bám vị trí và ổn định bay cho quadrotor trong trường hợp bất định các tham số. Thuật toán điều khiển thích nghi gradient tốc độ có ưu điểm đơn giản trong tổng hợp điều khiển, có tốc độ thích nghi cao, không nhất thiết yêu cầu tham số hóa mô hình toán học, do đó, phù hợp với các bài toán điều khiển thích nghi trong điều kiện bất định tham số. Các tham số bất định chính trong nghiên cứu này là khối lượng và các mô men quán tính theo các trục của quadrotor, được thể hiện khi tải ngoài của quadrotor thay đổi trong quá trình hoạt động. Ngoài ra, các hệ số khí động lực cản và các hệ số mô men cản cũng là các tham số không chắc chắn do giá trị chúng thay đổi theo môi trường hoạt động của quadrotor và không thể đo lường được một cách chính xác.

## 2. MÔ TẢ VÀ TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG

### 2.1. Mô tả hệ thống

Đối tượng xem xét là quadrotor được biểu diễn trên hình 1 [10].



**Hình 1.** Sơ đồ biểu diễn các hệ tọa độ và lực của quadrotor.

Trên hình 1 ta có các hệ tọa độ:  $OXYZ$ ,  $O_B X_B Y_B Z_B$  là các hệ tọa độ mặt đất, hệ tọa độ liên kết. Mô hình toán học chuyển động quadrotor có dạng sau [10]:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)U_1 - K_x \dot{x}; \\ m\ddot{y} &= (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi)U_1 - K_y \dot{y}; \\ m\ddot{z} &= (\cos\phi \cos\theta)U_1 - mg - K_z \dot{z} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_x \ddot{\phi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z) - J_r \dot{\theta}\Omega_{md} - K_\phi \dot{\phi}^2 + U_2; \\ I_y \ddot{\theta} &= \dot{\phi}\dot{\psi}(I_x - I_z) - J_r \dot{\psi}\Omega_{md} - K_\theta \dot{\theta}^2 + U_3; \\ I_z \ddot{\psi} &= \dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y) - K_\psi \dot{\psi}^2 + U_4; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Viết lại phương trình (1) về dạng:

$$m\ddot{x} = F_x - K_x \dot{x}; \quad m\ddot{y} = F_y - K_y \dot{y}; \quad m\ddot{z} = F_z - K_z \dot{z} \quad (3)$$

Trong đó:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) U_1 \\ F_y &= (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) U_1 \\ F_z &= (\cos \phi \cos \theta) U_1 - mg \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Các tham số trong các phương trình (1), (2), (3), (4) được ký hiệu như sau:

$m$  - Khối lượng của quadrotor;  $U_1, U_2, U_3, U_4$  - Các tín hiệu điều khiển, trong đó:  $U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$  là tổng lực điều khiển nâng được tạo ra bởi bốn động cơ điện;  $U_2 = Lb(\Omega_1^2 - \Omega_3^2)$  là mô men điều khiển quay quadrotor quanh trục OX;  $U_3 = Lb(\Omega_2^2 - \Omega_4^2)$  là mô men điều khiển quay quadrotor quanh trục OY;  $U_4 = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2)$  là mô men điều khiển quay quadrotor quanh trục OZ, với  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  là tốc độ góc của 4 cánh quạt của quadrotor;  $L$  là khoảng cách từ khối tâm của quadrotor đến tâm của cánh quạt,  $b > 0$  và  $d > 0$  là hệ số lực đẩy và hệ số lực cản của cánh quạt;  $\phi, \theta, \psi$  lần lượt là góc cren, góc chúc ngóc và góc hướng;  $J_r$  mô men quán tính của động cơ;  $I_x, I_y, I_z$  các mô men quán tính theo các trục XYZ;  $K_x, K_y, K_z$  là các hệ số khí động lực cản theo các trục XYZ;  $K_\phi, K_\theta, K_\psi$  là các hệ số mô men cản.

## 2.2. Tổng hợp luật điều khiển vị trí cho quadrotor

Ta ký hiệu các biến trạng thái của hệ phương trình (1) như sau:

$$x_1 = x, \dot{x}_1 = x_2, x_3 = y, \dot{x}_3 = x_4, x_5 = z, \dot{x}_5 = x_6, \quad (5)$$

Khi đó, (3) được viết lại như sau:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = \frac{1}{m} F_x - \frac{1}{m} K_x x_2; \dot{x}_3 = x_4; \dot{x}_4 = \frac{1}{m} F_y - \frac{1}{m} K_y x_4 \\ \dot{x}_5 = x_6; \dot{x}_6 = \frac{1}{m} F_z - \frac{1}{m} K_z x_6 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Ta cần xác định các tín hiệu điều khiển  $F_x, F_y, F_z$  sao cho các biến vị trí  $x, y, z$  bám theo các tín hiệu đặt  $x_d, y_d, z_d$ . Viết (6) về dạng phương trình vector

$$\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p \quad (7)$$

Trong đó:  $\mathbf{x}_p = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T$ ;  $\mathbf{u}_p = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$ ;

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_x/m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_y/m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_z/m \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m \end{bmatrix}$$

Phương trình của mô hình tham chiếu được cho dưới dạng

$$\dot{\mathbf{x}}_M(t) = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M(t) + \mathbf{B}_M \mathbf{r}(t) \quad (8)$$

Sử dụng phương pháp gradient tốc độ [11], luật điều khiển thích nghi với các luật điều chỉnh tham số điều khiển như sau:

$$\mathbf{u}_p(t) = \mathbf{K}_{xp}(t)\mathbf{x}_p(t) + \mathbf{K}_{rp}(t)\mathbf{r}_p(t) + \mathbf{u}_{sp}(t) \quad (9)$$

Các tham số điều chỉnh thích nghi như sau:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{sp}(t) &= -\gamma \text{sign}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}(t)); \dot{\mathbf{K}}_{xp}(t) = -\gamma_1 \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}(t) \mathbf{x}_p^T(t) \\ \dot{\mathbf{K}}_{rp}(t) &= -\gamma_2 \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}(t) \mathbf{r}_p^T(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Trong đó:  $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M$  - Vector sai số, đặc trưng cho độ lệch của trạng thái đối tượng so với trạng thái mô hình tham chiếu;  $\gamma, \gamma_1, \gamma_2 > 0$  - Độ lợi của thuật toán điều chỉnh dương;  $\mathbf{P}$  - Ma trận xác định dương đối xứng thỏa mãn phương trình Lyapunov có dạng sau  $\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{Q}$ . Trong đó,  $\mathbf{Q}$  - Ma trận xác định dương đối xứng.

Khi đã xác định được luật điều khiển  $\mathbf{u}_p = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$  ta có thể xác định được một tín hiệu điều khiển quadrotor  $U_1$  và các tín hiệu tham chiếu cho các góc Euler  $\phi$  và  $\theta$  dựa vào phương trình (9) và (4):

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arctan\left(\frac{s_1}{F_z + mg}\right); \phi = \arctan\left(\frac{s_2}{\sqrt{m^2 g^2 + 2mgF_z + F_z^2 + s_1^2}}\right) \\ U_1 &= \frac{mg + F_z}{\cos\theta \cos\phi} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Trong đó:  $s_1 = \frac{\cos\psi F_x + \sin\psi F_y}{(\cos\psi)^2 + (\sin\psi)^2}; s_2 = \frac{\sin\psi F_x - \cos\psi F_y}{(\cos\psi)^2 + (\sin\psi)^2}$ .

### 2.3. Tổng hợp luật điều khiển các góc trạng thái cho quadrotor

Từ hệ phương trình (2), đặt các biến trạng thái như sau:

$$x_7 = \phi, \dot{x}_7 = x_8, x_9 = \theta, \dot{x}_9 = x_{10}, x_{11} = \psi, \dot{x}_{11} = x_{12}$$

Hệ phương trình (2) được viết lại

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_7 = x_8; \dot{x}_8 &= \frac{1}{I_x} \left[ (I_y - I_z) x_{10} x_{12} - x_{10} J_r O_{md} - K_\phi x_8^2 + U_2 \right] \\ \dot{x}_9 = x_{10}; \dot{x}_{10} &= \frac{1}{I_y} \left[ (I_z - I_x) x_8 x_{12} - x_8 J_r O_{md} - K_\theta x_{10}^2 + U_3 \right] \\ \dot{x}_{11} = x_{12}; \dot{x}_{12} &= \frac{1}{I_z} \left[ (I_x - I_y) x_8 x_{10} - K_\psi x_{12}^2 + U_4 \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Ta cần xác định các tín hiệu điều khiển  $U_2, U_3, U_4$  sao cho các góc Euler  $\phi, \theta, \psi$  bám theo các góc tham chiếu  $\phi_d, \theta_d, \psi_d$ .

Ta viết lại (12) dưới dạng phương trình vector (13) như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}_q = \mathbf{A}_q \mathbf{x}_q + \mathbf{B}_q (\mathbf{u}_q + \mathbf{W}^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}_q)) \quad (13)$$

Trong đó:  $\mathbf{x}_q = [x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}]^T$ ;  $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{8 \times 3}$  - Ma trận hằng số chưa biết.

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}_q) = [x_8 \Omega_{md} \ x_{10} \Omega_{md} \ x_8^2 \ x_{10}^2 \ x_{12}^2 \ x_8 x_{10} \ x_{10} x_{12} \ x_8 x_{12}]^T ; \mathbf{u}_q = [U_2 \ U_3 \ U_4]^T$$

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_z \end{bmatrix}$$

Phương trình của mô hình tham chiếu được cho dưới dạng

$$\dot{\mathbf{x}}_{Mq}(t) = \mathbf{A}_{Mq} \mathbf{x}_{Mq}(t) + \mathbf{B}_{Mq} \mathbf{r}_q(t) \quad (14)$$

Sử dụng phương pháp gradient tốc độ [11], luật điều khiển thích nghi và các luật điều chỉnh tham số điều khiển như sau:

$$\mathbf{u}_q(t) = \mathbf{K}_{xq}(t) \mathbf{x}_q(t) + \mathbf{K}_{r_q}(t) \mathbf{r}_q(t) - \hat{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}_q) + \mathbf{u}_{sq}(t) \quad (15)$$

Thuật toán điều chỉnh thích nghi như sau:

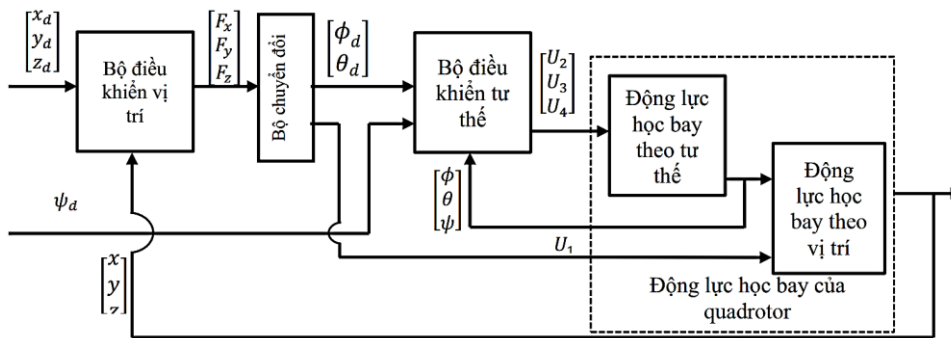
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{sq}(t) &= -\gamma_3 \text{sign}(\mathbf{B}_q^T \mathbf{P}_q \mathbf{e}_q(t)); \dot{\mathbf{K}}_{xq}(t) = -\gamma_4 \mathbf{B}_q^T \mathbf{P}_q \mathbf{e}_q(t) \mathbf{x}_q^T(t) \\ \dot{\mathbf{K}}_{r_q}(t) &= -\gamma_5 \mathbf{B}_q^T \mathbf{P}_q \mathbf{e}_q(t) \mathbf{r}_q^T(t); \dot{\hat{\mathbf{W}}}(t) = -\gamma_6 \mathbf{B}_q^T \mathbf{P}_q \mathbf{e}_q(t) \boldsymbol{\sigma}^T(t) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Trong đó:  $\mathbf{e}_q = \mathbf{x}_q - \mathbf{x}_{Mq}$  - Vectơ sai số, đặc trưng cho độ lệch của trạng thái đối tượng so với trạng thái mô hình tham chiếu;  $\gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6 > 0$  - Độ lợi của thuật toán điều chỉnh dương;  $\mathbf{P}_q$  - Ma trận xác định dương đối xứng thỏa mãn phương trình Lyapunov có dạng sau  $\mathbf{A}_{qM}^T \mathbf{P}_q + \mathbf{P}_q \mathbf{A}_{qM} = -\mathbf{Q}_q$ . Trong đó  $\mathbf{Q}_q$  - Ma trận xác định dương đối xứng.

Tính ổn định của các luật điều khiển (9), (10) và (15), (16) được chứng minh toán học và trình bày trong nghiên cứu của Boris Andrievsky [12].

### 3. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI QUADROTOR

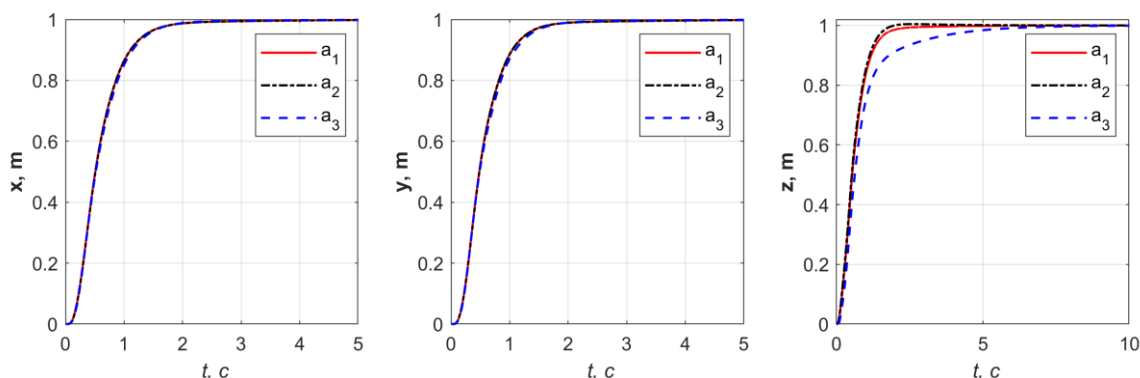
Cho quadrotor có các tham số như sau [10]:  $m = 0.5 \text{ kg}$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $J_x = J_y = 0.005 \text{ kg.m}^2$ ,  $J_z = 0.01 \text{ kg.m}^2$ ,  $L = 0.5 \text{ m}$ ,  $b = 2.984 \cdot 10^{-5} \text{ N s}^2/\text{rad}^2$ ,  $d = 3.30 \cdot 10^{-7} \text{ N s}^2/\text{rad}^2$ ,  $J_r = 2.8385 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ ,  $K_x = K_y = K_z = K_\phi = K_\theta = K_\psi = 0.01$ .



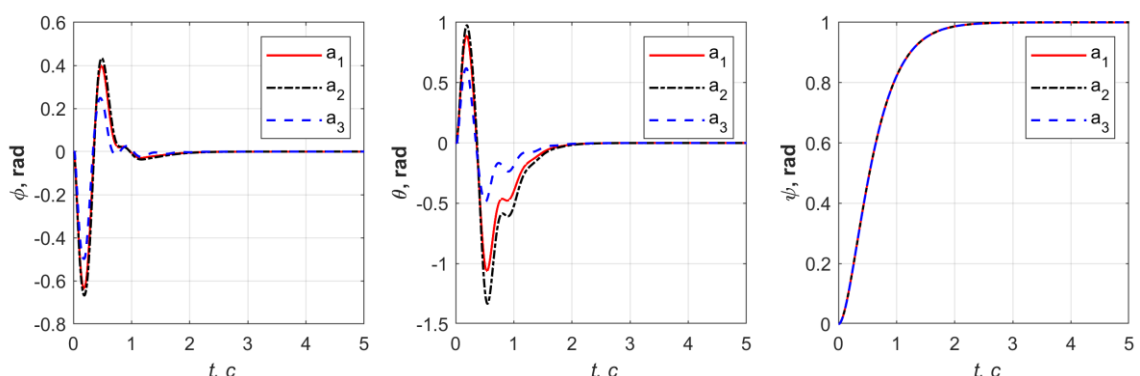
Hình 2. Sơ đồ tổng quát điều khiển bay cho quadrotor.

Các kết quả mô phỏng vị trí, các góc Euler của quadrotor và bám theo quỹ đạo đặt được trình bày trên hình 3-7 với các trường hợp thay đổi tham số hệ thống như sau ( $a_1, a_2, a_3$ ).

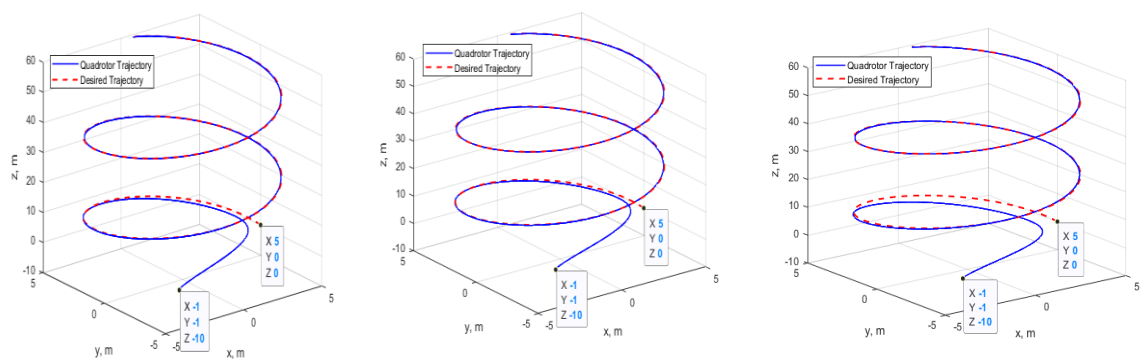
	m	$I_x$	$I_y$	$I_z$	$K_x$	$K_y$	$K_z$	$K_\phi$	$K_\theta$	$K_\psi$
$a_1$	0.5	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$a_2$	0.4	0.0025	0.0025	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
$a_3$	1.5	0.015	0.015	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05



**Hình 3.** Đáp ứng của quadrotor theo các trục  $x, y, z$ .



**Hình 4.** Đáp ứng của quadrotor theo góc cren, góc chúc góc và góc hướng.



**Hình 5.** Quỹ đạo bay của quadrotor trong các trường hợp tham số  $a_1, a_2, a_3$ .

Bài báo mô phỏng đáp ứng của quadrotor theo vị trí và các góc trạng thái cũng như mô phỏng bám quỹ đạo bay của quadrotor trong trường hợp tham số bất định. Từ đó, đánh giá được độ ổn định của hệ thống điều khiển thích nghi bám vị trí và trạng thái của quadrotor.

**Nhận xét:**

- Trong trường hợp bất định tham số, hệ thống điều khiển thích nghi ổn định toàn cục với chỉ tiêu chất lượng đạt yêu cầu thiết kế, phù hợp với công suất động cơ của quadrotor.
- Trường hợp tín hiệu đầu vào không đổi. Khi tham số của hệ thống thay đổi, đáp ứng của quadrotor theo x,y và theo góc hướng hầu như không thay đổi và bám sát nhanh theo tín hiệu đặt. Đáp ứng của quadrotor theo góc cren và góc chúc ngóc thay đổi trong phạm vi cho phép và thời gian quá độ của các đặc tính trên trên là gần như không đổi, đạt trạng thái cân bằng một cách nhanh chóng. Còn trong đáp ứng của quadrotor theo trục z, thời gian quá độ tăng không đáng kể khi tăng khối lượng quadrotor, không có hiện tượng vọt lố và mất ổn định xảy ra trong quá trình điều khiển bay.
- Trường hợp tín hiệu đầu vào dạng tham số quỹ đạo. Khi tham số của hệ thống thay đổi, quadrotor vẫn bám sát quỹ đạo đặt theo đúng thiết kế của hệ thống thích nghi, không có hiện tượng vọt lố và mất ổn định xảy ra trong quá trình điều khiển bay bám quỹ đạo.
- Kết quả mô phỏng chỉ ra sự hiệu quả của bộ điều khiển thích nghi đã thiết kế.

**4. KẾT LUẬN**

Trên cơ sở phương pháp điều khiển thích nghi với thuật toán gradient tốc độ với ưu điểm nổi bật là thiết kế không phức tạp, tốc độ thích nghi cao, các tác giả đã đề xuất tổng hợp bộ điều khiển thích nghi bám vị trí và ổn định bay cho quadrotor trong điều kiện các tham số bất định. Các kết quả mô phỏng bám vị trí và quỹ đạo của quadrotor đã chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển thích nghi thông qua các tiêu chí đánh giá: tính bền vững với sự thay đổi của môi trường và tải ngoài, đảm bảo tốt đặc tính động và đặc tính tĩnh, đảm bảo tính chính xác bám và ổn định bay. Có thể kết luận rằng, khi lắp đặt thêm các thiết bị phụ trợ lên quadrotor, hệ thống điều khiển thích nghi bay cho quadrotor vẫn hoạt động tốt, thỏa mãn các yêu cầu sử dụng quadrotor trong thực tiễn phục vụ cho các công tác nghiên cứu và thực hiện nhiệm vụ. Trong công trình tới, các tác giả sẽ tập trung giải quyết vấn đề điều khiển quadrotor trong điều kiện khó khăn khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoài.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. R. Austin, “Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment vol. 54”: John Wiley & Sons, (2011).
- [2]. G. Hoffmann, D. G. Rajnarayan, S. L. Waslander, D. Dostal, J. S. Jang, and C. J. Tomlin, “The Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (STARMAC),” in Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04. The 23rd, pp. 12. E. 4-121, (2004).
- [3]. J. P. How, B. BEHREKE, A. Frank, D. Dale, and J. Vian, “Real-time indoor autonomous vehicle test environment,” IEEE control systems, vol. 28, pp. 51-64, (2008).
- [4]. F. Šolc, “Modelling and Control of a Quadcopter,” Advanced in Military Technology, vol. 1, pp. 29-38, (2007).
- [5]. M. Prabha, R. Thottungal, and S. Kaliappan, “Modeling and Simulation of X-Quadcopter Control,” International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) [online] Available at: <http://www.ijraset.com/files/serve.php>, (2016).
- [6]. A. Das, F. Lewis, and K. Subbarao, “Backstepping approach for controlling a quadrotor using lagrange form dynamics,” Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 56, pp. 127-151, (2009).
- [7]. Outeiro P., Carlos B. and Paulo J. “Multiple-model control architecture for a quadrotor with constant unknown mass and inertia.” Mechatronics 73, (2021). DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102455.
- [8]. Trong-Toan Tran, Shuzhi Sam Ge & Wei He: “Adaptive Control of a Quadrotor Aerial Vehicle with Input Constraints and Uncertain Parameters”, International Journal of Control, (2017), DOI: 10.1080/00207179.2017.1309572

- [9]. Han Q, Liu X, Liu Z, Su H. “*Adaptive Control for Quadrotors with Uncertain and Faulty Actuators*”. Research Square; (2021). DOI: 10.21203/rs.3.rs-910922/v1
- [10]. V T Tran, A M Korikov and D K Tran “*Synthesis of an algorithm for automatic control of the quadcopter position using the control force estimation method*” Journal of Physics: Conference Series, Volume 2291, The 17th International Conference on Electronic Devices and Control Systems, EDSCS, (2021).
- [11]. Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков, “*Метод скоростного градиента и его приложения*”, Автомат. и телемех., № 9, 3–72, (2021).
- [12]. Б. Р. Андриевский. “*Нелинейные комбинированные системы управления движением*”. Диссертация доктора технических наук. - Санкт-Петербург. - 232 с, (2004).

### **ABSTRACT**

#### **Adaptive control of a quadrotor with uncertain parameters**

*This paper presents the results of synthesizing a control law for position tracking and stabilization of an unmanned aerial vehicle (UAV) in the form of a quadrotor, using a speed-gradient method in an adaptive control algorithm that adapts to uncertain changes in parameters. Simulation results in MATLAB/SIMULINK with an assumed quadrotor model demonstrate that using the adaptive controller helps the quadrotor operate stably and track the desired trajectory in cases of uncertain quadrotor parameters.*

**Keywords:** Aerial Vehicle; Quadrotor; Speed-gradient; Adaptive control; Uncertain parameters.