

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BACKSTEPPING CHO UAV KIỂU QUADROTOR CÓ TÍNH ĐẾN SỰ BẤT ĐỊNH CỦA MÔ HÌNH

DESIGN OF BACKSTEPPING SLIDING MODE CONTROLLER FOR QUADROTOR-TYPE UAV CONSIDERING MODEL UNCERTAINTY

Đặng Tiến Trung^{1,*}, Phạm Thị Thanh Đàm¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.363>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp mô hình của UAV Quadrotor, có tính đến các ràng buộc phi tuyến, bất định mô hình và nhiễu loạn khí động học. Từ đó sử dụng bộ điều khiển trượt backstepping thích nghi để đảm bảo tính ổn định, bền vững. Kết quả nghiên cứu được đánh giá thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển đã đạt được các yêu cầu chất lượng điều khiển.

Từ khóa: Điều khiển cuốn chiếu, phương tiện bay không người lái, thích nghi, bền vững.

ABSTRACT

The paper presents the results of synthesizing the model of the Quadrotor UAV, taking into account nonlinear constraints, model uncertainties and aerodynamic disturbances. From there, an adaptive backstepping sliding controller is used to ensure stability and sustainability. The results are evaluated through simulation on Matlab-Simulink software, showing that the controller has achieved the control quality requirements.

Keywords: Backstepping control, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Adaptive, Robust.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: dangtientrung@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/10/2024

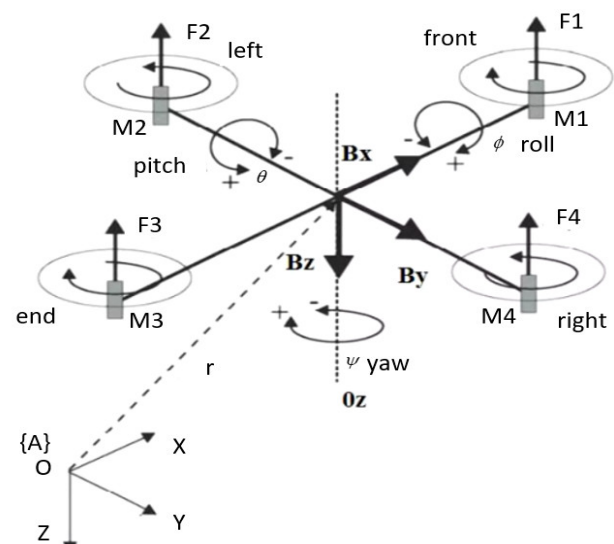
Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

1. GIỚI THIỆU

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) là phương tiện bay được điều khiển từ xa, tự bay theo lộ trình định sẵn hoặc theo điều khiển của các hệ thống máy tính. Thời gian qua,

UAV không ngừng được nâng cấp, phát triển và được ứng dụng vào nhiều lĩnh vực của đời sống xã hội. Trong quân sự, vai trò của UAV đang ngày càng khẳng định tầm quan trọng trên chiến trường. Để điều khiển quỹ đạo bay của UAV quadrotor cần có các bộ điều khiển các góc trạng thái như: φ góc pitch; θ góc roll; ψ góc yaw [1, 2]. Với điều kiện bay phức tạp, có nhiễu động kết hợp mô hình bất định của UAV thì cần xây dựng bộ điều khiển bền vững, chống rung tốt, tác động nhanh. Qua khảo sát cho thấy, bộ điều khiển trượt backstepping thích nghi cho kết quả điều khiển tốt ngay cả khi có nhiễu loạn tác động [3, 4].

2. MÔ HÌNH TOÁN



Hình 1. UAV kiểu Quadrotor

Xét hệ quy chiếu quán tính có gốc tại A(O,X,Y,Z) và hệ tọa độ có gốc tại trọng tâm Quadrotor B(o,x,y,z) như hình 1.

Từ các giả định: cấu trúc Quadrotor là cứng và đối xứng; lực đẩy và lực cản tỷ lệ thuận với bình phương của tốc độ của cánh quạt. Sử dụng công thức của Newton-Euler, các phương trình động lực học được viết dưới dạng sau:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x} \{ \dot{\theta} \dot{\psi} (I_y - I_z) + T_x \} \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} \{ \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + T_y \} \\ \ddot{\psi} = \frac{T_z}{I_z} \\ \ddot{x} = \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) (-F_L) \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) (-F_L) \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta (-F_L) + g \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, m là khối lượng, $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính hằng số xác định dương đối xứng của Quadrotor.

$$J = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix}$$

T_x, T_y, T_z lần lượt là moment xoắn theo các trục x, y, z ; F_L là tổng lực nâng do 4 động cơ tạo ra $\vec{F}_L = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$; g là gia tốc trọng trường; ϕ là góc pitch; θ là góc roll; ψ là góc yaw.

Nếu tính đến các thành phần bất định f_i trong mô hình có:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x} \{ \dot{\theta} \dot{\psi} (I_y - I_z) + T_x \} + f_1 \dot{\theta} + f_2 \theta + f \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} \{ \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + T_y \} + f_3 \dot{\phi} + f_4 \phi + f \\ \ddot{\psi} = \frac{T_z}{I_z} + f_5 \dot{\psi} + f_6 \psi + f \\ \ddot{x} = \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) (-F_L) - f_x \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) (-F_L) - f_y \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta (-F_L) + g + f_z \end{cases} \quad (2)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BACKSTEPPING THÍCH NGHI

Trong phần này, sẽ đi thiết kế luật điều khiển cho kênh z , các kênh điều khiển khác được suy ra tương tự. Dựa trên

hệ phương trình (1), phương trình động của kênh z như sau:

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta (-F_L) + g \quad (3)$$

Đặt: $X_1 = z; X_2 = \dot{z}; U_1 = -F_L$. Đưa (3) về hệ:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta U_1 + g \end{cases} \quad (4)$$

Có sai lệch $e_1 = X_1 - z_d$

$$\dot{e}_1 = \dot{X}_1 - \dot{z}_d = X_2 - \dot{z}_d \quad (5)$$

Chọn hàm Lyapunov sau:

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (6)$$

Đạo hàm 2 vế (6) có:

$$\dot{V}_1(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 = e_1 \cdot (X_2 - \dot{z}_d) < 0; (\forall e_1 \neq 0) \quad (7)$$

Đặt X_{2d} là tín hiệu điều khiển ảo, đảm bảo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov:

$$X_{2d} = -C_1 e_1 + \dot{z}_d; C_1 > 0 \quad (8)$$

Đặt $e_2 = X_2 - X_{2d}$ có:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{X}_2 - \dot{X}_{2d} \\ &= \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta U_1 + g + C_1 \dot{e}_1 - \ddot{z}_d \end{aligned} \quad (9)$$

Chọn hàm Lyapunov V_2 có dạng:

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (10)$$

Đạo hàm 2 vế (10) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 < 0; (\forall e_1, e_2 \neq 0) \\ &= -C_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 \left(\frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta U_1 + g + C_1 \dot{e}_1 - \ddot{z}_d \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Từ tiêu chuẩn ổn định Lyapunov để đảm bảo hệ thống ổn định tiệm cận, toàn cục, luật điều khiển có dạng:

$$U_2 = m \frac{1}{\cos \phi \cos \theta} (e_1 + g + C_1 e_2 - C_1^2 e_1 - \ddot{z}_d + C_2 e_2) \quad (12)$$

Chọn mặt trượt:

$$s_z = e_2 = X_2 - \dot{X}_{1d} - C_1 e_1 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \dot{s}_z &= -k_z \text{sign}(s_z) - q_1 s_z = \dot{X}_2 - \ddot{X}_{1d} - C_1 \dot{e}_1 \\ &= \frac{1}{m} \cos \phi \cos \theta U_1 + g - \ddot{X}_{1d} - C_1 (\dot{X}_{1d} - \dot{X}_1) \end{aligned} \quad (14)$$

Để đảm bảo hệ ổn định và hội tụ cần thỏa mãn điều kiện $s \cdot \dot{s} < 0$ theo đó rút ra luật điều khiển sau:

$$U_z = m \frac{1}{\cos f \cos \theta} \begin{pmatrix} k_z \text{sign}(s_z) + q_z s_z + g \\ -\ddot{X}_{1d} - C_1(\dot{X}_{1d} - X_2) \end{pmatrix} \quad (15)$$

Với cách làm tương tự sẽ tìm được luật điều khiển cho các kênh x, y, ϕ, θ, ψ :

$$\begin{cases} U_x = m \frac{1}{U_z} (k_x \text{sign}(s_x) + q_x s_x - \ddot{X}_{3d} - C_x(\dot{X}_{3d} - X_4)) \\ U_y = m \frac{1}{U_z} (k_y \text{sign}(s_y) + q_y s_y - \ddot{X}_{5d} - C_y(\dot{X}_{5d} - X_6)) \\ U_z = m \frac{1}{\cos f \cos \theta} \begin{pmatrix} k_z \text{sign}(s_z) + q_z s_z + g \\ -\ddot{X}_{1d} - C_1(\dot{X}_{1d} - X_2) \end{pmatrix} \\ U_f = I_x \begin{pmatrix} -k_f \text{sign}(s_f) - q_f s_f - \dot{\theta} \dot{f} \frac{I_y - I_z}{I_x} \\ +\ddot{X}_{7d} - C_2(\dot{X}_{7d} - X_8) \end{pmatrix} \\ U_\theta = I_y \begin{pmatrix} -k_\theta \text{sign}(s_\theta) - q_\theta s_\theta - \dot{\psi} \dot{\theta} \frac{I_z - I_x}{I_y} \\ +\ddot{X}_{9d} - C_3(\dot{X}_{9d} - X_{10}) \end{pmatrix} \\ U_\psi = I_z (-k_\psi \text{sign}(s_\psi) - q_\psi s_\psi + \ddot{X}_{11d} - C_4(\dot{X}_{11d} - X_{12})) \end{cases} \quad (16)$$

Để đánh giá các đại lượng bất định trong mô hình của quadrotor ta sử dụng giá trị ước lượng, với kênh điều khiển ϕ được tính như sau:

$$\begin{cases} \tilde{f} = f - \hat{f} \\ \tilde{f}_1 = f_1 - \hat{f}_1 \\ \tilde{f}_2 = f_2 - \hat{f}_2 \end{cases} \quad (17)$$

Trong đó: $\hat{f}, \hat{f}_1, \hat{f}_2$ là giá trị ước lượng; $\tilde{f}, \tilde{f}_1, \tilde{f}_2$ là sai số ước lượng.

Từ (2) phương trình sai số:

$$\begin{cases} \dot{e}_7 = X_8 - \phi_d \\ \dot{e}_8 = \frac{1}{I_x} \{ \dot{\theta} \psi (I_y - I_z) + T_x \} + f_1 \dot{\theta} + f_2 \theta + f - \dot{X}_{8d} \end{cases} \quad (18)$$

Từ (17), (18) rút ra luật điều khiển thích nghi cho kênh ϕ :

$$U_\phi = I_x (-Z_7 - \dot{\psi} \dot{\theta} \frac{I_y - I_z}{I_x} - C_7 Z_8 + C_7^2 Z_7 - C_8 Z_8 - \hat{f}_1 \dot{\theta} - \hat{f}_2 \theta - \hat{f}) \quad (19)$$

Các kênh còn lại được tìm tương tự.

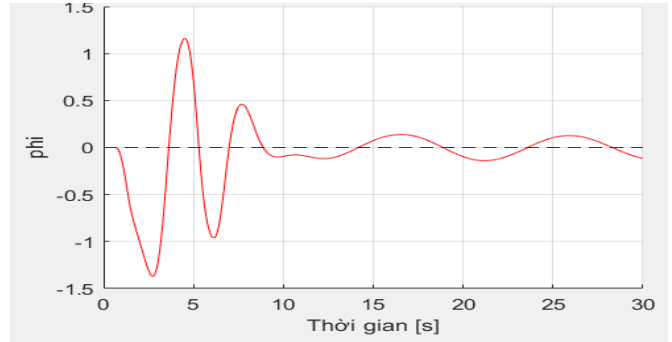
4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Tham số mô phỏng

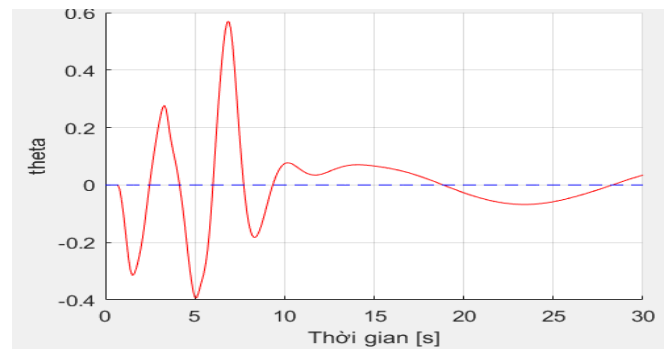
UAV có khối lượng $m = 1,3\text{kg}$; $g = 9,81\text{m/s}^2$; $L = 0,18\text{m}$; $I_x = I_y = 5,3 \cdot 10^{-4}\text{kg.m}^2$; $I_z = 3,1 \cdot 10^{-4}\text{kg.m}^2$; $C_i = 50$; $\gamma_i = 10$; $k_i = 0,5$; $\lambda = 1$; $f_i = 1$.

4.2. Kết quả mô phỏng

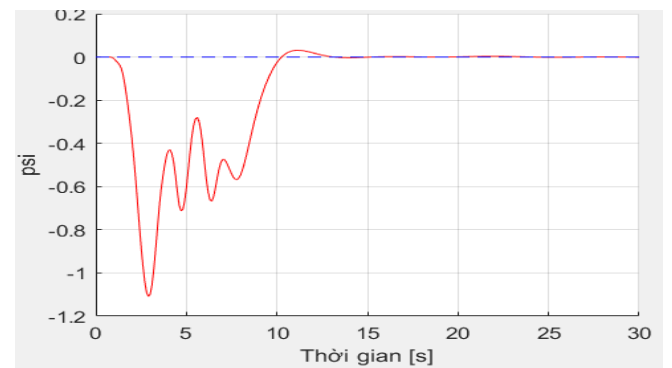
Tiến hành mô phỏng UAV quadrotor cơ động trong cả 3 mặt phẳng xyz, kiểm tra đáp ứng các góc ϕ, θ, ψ , đáp ứng vị trí của quadrotor so với giá trị đặt. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 2 ÷ 9.



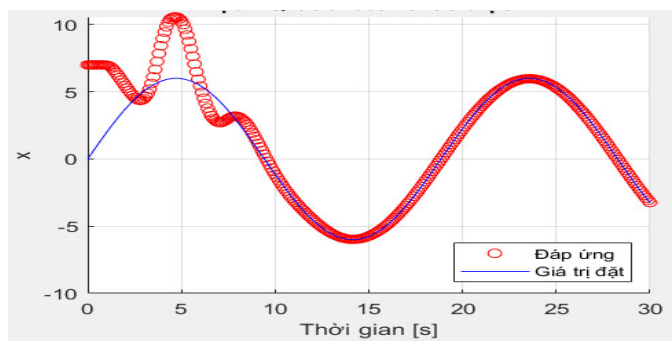
Hình 2. Đáp ứng góc ϕ



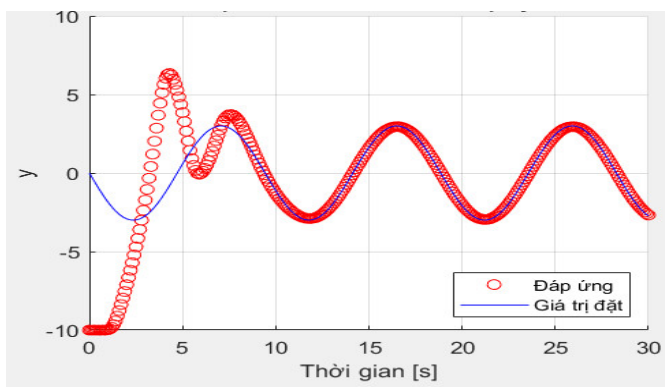
Hình 3. Đáp ứng góc θ



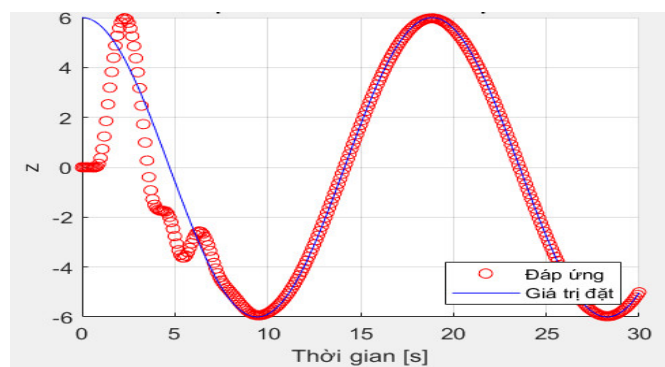
Hình 4. Đáp ứng góc ψ



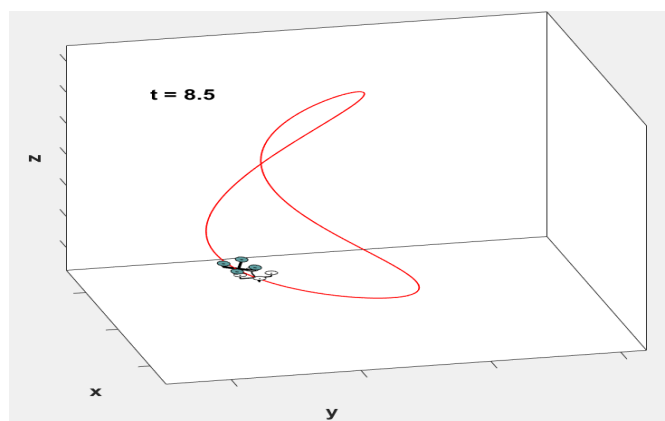
Hình 5. Vị trí quadrotor theo trục x



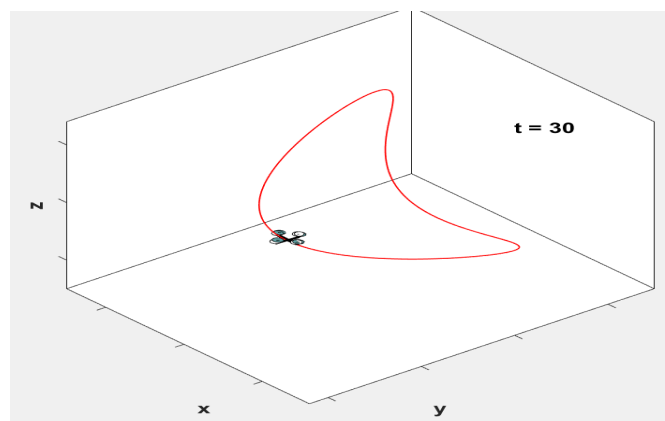
Hình 6. Vị trí quadrotor theo trục y



Hình 7. Vị trí quadrotor theo trục z



Hình 8. Vị trí quadrotor tại thời điểm 8,5s



Hình 9. Vị trí quadrotor tại thời điểm 30s

Nhận xét: Qua kết quả mô phỏng ta thấy, bộ điều khiển trượt backstepping cho các kênh điều khiển có hiệu quả tốt trong điều khiển UAV. Thời gian để UAV bám theo đúng quỹ đạo đặt là 7s, sai số xác lập gần như bằng 0, ổn định, chống nhiễu tốt.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt backstepping thích nghi cho các kênh điều khiển của UAV quadrotor. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình toán, tổng hợp bộ điều khiển, mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Các kết quả kiểm nghiệm cho thấy:

- Thứ nhất, việc sử dụng bộ điều khiển trượt backstepping thích nghi làm tăng tính ổn định của hệ thống, đảm bảo độ chính xác trong điều khiển.
- Thứ hai, phương pháp này đã giúp giảm tối đa sai số và hiện tượng dao động, trong điều kiện hệ thống chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến, bất định của mô hình và nhiễu loạn khí động học trong quá trình bay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Raafat, F. Raheem, A. Alawsy, Z. Mahmood, "Application and Control of Quadrotors," *Earth Systems Protection and Sustainability*, 241-264, 2022.

[2]. S. H. Derrouaoui, Y. Bouzid, A. Belmouhoub, M. Guiatni, H. Siguerdidjane, "Recent Developments and Trends in Unconventional UAVs Control: A Review," *J Int Rob Syst*, 109, 68, 2023.

[3]. H. Hassani, A. Mansouri, A. Ahaitouf, "Backstepping based super twisting sliding mode attitude control for a quadrotor aircraft subjected to wind disturbances: Experimental validation," *Int. J. Dyn. Control*, 11, 1285-1296, 2023.

[4]. J. Pan, B. Shao, J. Xiong, Q. Zhang, "Attitude Control of Quadrotor UAVs Based on Adaptive Sliding Mode," *Inter. J. Cont. Auto. Syst*, 21, 8, 2698-2707, 2023.

AUTHORS INFORMATION

Dang Tien Trung, Phạm Thị Thanh Dam
Electric Power University, Vietnam