

TỔNG HỢP HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN CHO QUADROTOR

Phùng Đình Kiên*
Email: kiensuong9614@gmail.com

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 07/05/2024

Ngày phản biện đánh giá: 14/11/2024

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/11/2024

DOI: 10.59266/houjs.2024.485

Tóm tắt: Quadrotor được ứng dụng nhiều trong giám sát núi lửa, cháy rừng, kiểm tra đường dây điện, tìm kiếm người thất lạc, cứu hộ thiên tai,.... Quadrotor được trang bị bốn động cơ với 4 cánh quạt với mục đích điều khiển và ổn định chuyển động của quadrotor, điều này làm cho mô hình động lực học của quadrotor phức tạp và có sự phi tuyến mạnh. Bài báo tập trung phát triển mô hình toán quadrotor, thiết kế bộ điều khiển PID và LQR, tiến hành mô hình hóa và mô phỏng các bộ điều khiển trên Matlab/Simulink. Các kết quả mô phỏng được đưa ra để chứng minh tính hiệu quả của các bộ điều khiển.

Từ khóa: Tổng hợp hệ thống điều khiển, Quadrotor, UAV, LQR, PID.

I. Đặt vấn đề

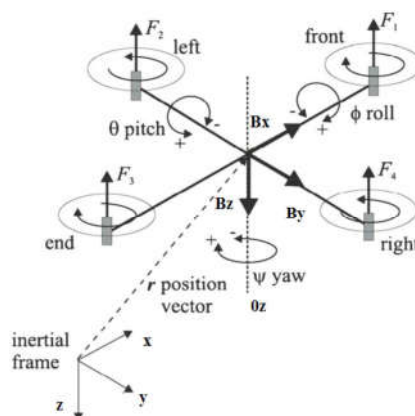
Hiện nay, trên thế giới, thiết bị bay không người lái (hay còn gọi là - UAV) ngày càng phát triển và được ứng dụng rộng rãi trong cả lĩnh vực quân sự và dân sự. Trong đó, loại Quadrotor đang được sử dụng phổ thông hơn nhờ vào cấu trúc đơn giản, tính đối xứng, dễ dàng thiết kế, điều khiển và có thể hoạt động linh hoạt trong khu vực nhỏ. Tuy nhiên, việc xây dựng một hệ thống UAV hoàn chỉnh không đơn giản và tồn tại rất nhiều rủi ro như sai số về thiết kế các chi tiết phần cứng, thuật toán hoạt động không ổn định, trong quá trình hoạt động có thể gây ra những tai nạn ngoài ý muốn v.v. Việc thiết kế một bộ điều khiển cho thiết bị là một vấn đề quan trọng hàng đầu.

Trong thực tế có rất nhiều nghiên cứu về bộ điều khiển cho quadrotor của nhiều tác giả đưa ra. Trong bài báo này tác giả đi sâu tổng hợp 2 bộ điều khiển là: bộ điều khiển

PID và bộ điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính LQR. Kết quả được mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink với các thông số của quadrotor bất kỳ, qua đó rút ra ưu nhược điểm của từng bộ điều khiển.

II. Cơ sở lý thuyết

2.1. Biến đổi mô hình toán của quadrotor



Hình 1. Hệ tọa độ đối với Quadrotor

* Khoa Vô tuyến điện tử, Trường Sĩ quan Không quân

Mô hình toán của quadrotor dạng phi tuyến:[2][6]

$$\begin{aligned}
 F &= Y \cdot q \cdot \frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}} + \frac{T_x}{J_{xx}} \\
 q &= Y \cdot F \cdot \frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}} + \frac{T_y}{J_{yy}} \\
 Y &= \frac{T_z}{J_{zz}} \\
 x &= (\cos F \cdot \sin q \cdot \cos Y + \sin F \cdot \sin Y) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L) \\
 y &= (\cos F \cdot \sin q \cdot \sin Y - \sin F \cdot \cos Y) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L) \\
 z &= g + \cos F \cdot \cos q \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Nhiệm vụ của bộ điều khiển là điều chỉnh tọa độ vị trí (x_0, y_0, z_0) và trạng thái $(\Phi_0, \theta_0, \Psi_0)$ ban đầu của quadrotor về tọa độ vị trí (x_d, y_d, z_d) và trạng thái $(\Phi_d, \theta_d, \Psi_d)$ mong muốn. Như vậy, việc ổn định quỹ đạo của quadrotor sẽ được thực hiện thông qua 6 kênh điều khiển đó là: kênh x dọc trục ox, kênh y dọc trục oy, kênh độ cao z dọc trục oz, kênh Φ , kênh θ và kênh Ψ .

Gọi vectơ trạng thái của quadrotor là $\bar{X}$, $\bar{X}$ chứa 12 thành phần động học của quadrotor theo thứ tự như sau: $\bar{X} = X(\Phi, \dot{\Phi}, \theta, \dot{\theta}, \Psi, \dot{\Psi}, z, \dot{z}, x, \dot{x}, y, \dot{y})$

Để thực hiện điều khiển, ta phân chia trạng thái của quadrotor theo từng kênh điều khiển tương ứng. Căn cứ vào hệ phương trình (1) và vectơ trạng thái $\bar{X}$ ta thành lập các phương trình động học tương ứng với từng kênh điều khiển như sau.

Đối với kênh điều khiển góc nghiêng Φ , ta có hệ phương trình động học tương ứng như sau:

$$\begin{aligned}
 F &= F \\
 F &= Y \cdot q \cdot \frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}} + \frac{T_x}{J_{xx}} \tag{2}
 \end{aligned}$$

Đặt $X_1 = \Phi$ và $X_2 = \dot{\Phi}$, do đó $\dot{X}_1 = \dot{\Phi}$ và $\dot{X}_2 = \ddot{\Phi}$. Đặt $T_x = U_2$ Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh Φ là:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X_2 \\
 X_2 &= Y \cdot q \cdot \frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}} + \frac{U_2}{J_{xx}} \tag{3}
 \end{aligned}$$

Đối với kênh điều khiển góc chúc ngóc θ , ta cũng có hệ phương trình động học tương ứng:

$$\begin{aligned}
 q &= q \\
 q &= Y \cdot F \cdot \frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}} + \frac{T_y}{J_{yy}} \tag{4}
 \end{aligned}$$

Đặt $X_3 = \theta$ và $X_4 = \dot{\theta}$, do đó $\dot{X}_3 = \dot{\theta}$ và $\dot{X}_4 = \ddot{\theta}$. Đặt $T_y = U_3$ Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh θ là:

$$\begin{aligned}
 X_3 &= X_4 \\
 X_4 &= Y \cdot F \cdot \frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}} + \frac{U_3}{J_{yy}} \tag{5}
 \end{aligned}$$

Đối với kênh điều khiển góc chúc hướng Ψ , ta cũng có hệ phương trình động học tương ứng:

$$\begin{aligned}
 Y &= Y \\
 Y &= \frac{T_z}{J_{zz}} \tag{6}
 \end{aligned}$$

Đặt $X_5 = \Psi$ và $X_6 = \dot{\Psi}$, do đó $\dot{X}_5 = \dot{\Psi}$ và $\dot{X}_6 = \ddot{\Psi}$. Đặt $T_z = U_4$ Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh Ψ :

$$\begin{aligned}
 X_5 &= X_6 \\
 X_6 &= \frac{U_4}{J_{zz}} \tag{7}
 \end{aligned}$$

Đối với kênh z, ta có hệ phương trình động học:

$$z = z$$

$$z = g + \cos F \cdot \cos q \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L) \quad (8)$$

Đặt $X_7 = z$ và $X_8 = \dot{z}$, do đó $\dot{X}_7 = \dot{z}$ và $\dot{X}_8 = \ddot{z}$. Đặt $F_L = U_1$. Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh z là:

$$X_7 = X_8$$

$$X_8 = g + \cos F \cdot \cos q \cdot \frac{1}{m} \cdot (-U_1) \quad (9)$$

Đối với kênh x, ta có hệ phương trình động học:

$$x = x$$

$$x = (\cos F \cdot \sin q \cdot \cos Y + \sin F \cdot \sin Y) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L) \quad (10)$$

$$X_{11} = X_{12}$$

$$X_{12} = (\cos F_d \cdot \sin q_d \cdot \sin Y_d - \sin F_d \cdot \cos Y_d) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-U_1) \quad (13)$$

$$\text{Đặt } a_1 = \frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}}, a_2 = \frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}}, a_3 = \frac{J_{xx} - J_{yy}}{J_{zz}}, b_1 = \frac{L}{J_{xx}}, b_2 = \frac{L}{J_{yy}}, b_3 = \frac{L}{J_{zz}}.$$

$$U_t = \cos(X_1) \cos(X_3) \cdot U_x = \cos(X_1) \sin(X_3) \cos(X_5) + \sin(X_1) \sin(X_5)$$

$$U_y = \cos(X_1) \sin(X_3) \sin(X_5) - \sin(X_1) \cos(X_5)$$

Khi đó, phương trình trạng thái phi tuyến có dạng:

$$\dot{X} = f(X, U) = \begin{bmatrix} f_1(X, U) \\ f_2(X, U) \\ f_3(X, U) \\ f_4(X, U) \\ f_5(X, U) \\ f_6(X, U) \\ f_7(X, U) \\ f_8(X, U) \\ f_9(X, U) \\ f_{10}(X, U) \\ f_{11}(X, U) \\ f_{12}(X, U) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ X_4 X_6 a_1 + b_2 U_2 \\ X_4 \\ X_2 X_6 a_2 + b_2 U_3 \\ X_6 \\ X_2 X_4 a_3 + b_3 U_4 \\ X_8 \\ -g + u_t \left(\frac{1}{m} \right) U_1 \\ X_{10} \\ u_x \left(\frac{1}{m} \right) U_1 \\ X_{12} \\ u_y \left(\frac{1}{m} \right) U_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Đặt $X_9 = x$ và $X_{10} = \dot{x}$, do đó $\dot{X}_9 = \dot{x}$ và $\dot{X}_{10} = \ddot{x}$. Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh x là:

$$X_9 = X_{10}$$

$$X_{10} = (\cos F_d \cdot \sin q_d \cdot \cos Y_d + \sin F_d \cdot \sin Y_d) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-U_1) \quad (11)$$

Trong đó Φ_d, θ_d, Ψ_d là các góc Euler mong muốn.

Đối với kênh y, ta có hệ phương trình động học:

$$y = y$$

$$y = (\cos F \cdot \sin q \cdot \sin Y - \sin F \cdot \cos Y) \cdot \frac{1}{m} \cdot (-F_L) \quad (12)$$

Đặt $X_{11} = y$ và $X_{12} = \dot{y}$, do đó $\dot{X}_{11} = \dot{y}$ và $\dot{X}_{12} = \ddot{y}$. Từ đó suy ra mô hình dạng truyền ngược chặt theo kênh y là:

Áp dụng phương pháp tuyến tính hóa, theo [7], sau khi thực hiện tuyến tính hóa, ta nhận được mô hình không gian trạng thái tuyến tính như sau:

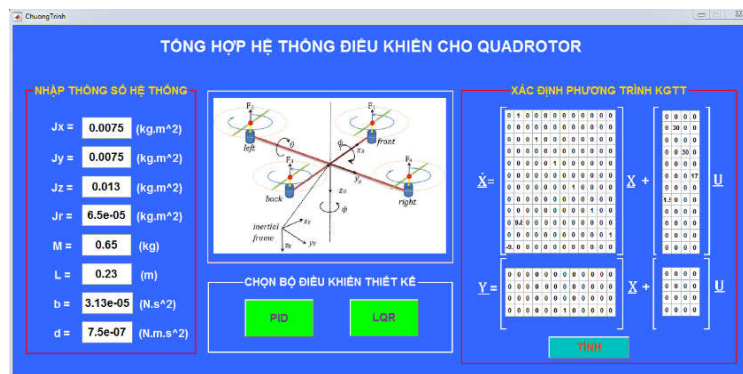
$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \\ \dot{X}_9 \\ \dot{X}_{10} \\ \dot{X}_{11} \\ \dot{X}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\frac{1}{m}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Như vậy, biến đổi mô hình toán học của quadrotor thành các hệ truyền ngược chặt theo sáu kênh điều khiển ($x, y, z, \Phi, \theta, \Psi$) và tuyến tính hóa, ta sẽ đưa về mô hình không gian trạng thái. Đây là cơ sở trong việc tổng hợp bộ điều khiển PID và LQR.

Ứng với mỗi loại Quadrotor khác nhau sẽ có thông số hệ thống khác nhau, do đó mô hình không gian trạng thái cũng được xác định bởi các ma trận đặc trưng riêng. Với việc lập trình trên GUI của

MatLab, đầu vào là nhập các thông số hệ thống của Quadrotor gồm: J_x (Moment quán tính theo trục x), J_y (Moment quán tính theo trục y), J_z (Moment quán tính theo trục z), J_r (Moment quán tính rotor), M (khối lượng quadrotor), L (Khoảng cách từ trọng tâm quadrotor đến trục động cơ), b (lực đẩy), d (lực kéo). Chương trình sẽ tự động tính toán và xác định phương trình không gian trạng thái đặc trưng cho mô hình Quadrotor (hình 2).



Hình 2. Giao diện GUI chương trình Tổng hợp hệ thống điều khiển cho Quadrotor

2.2. Xây dựng bộ điều khiển PID cho quadrotor

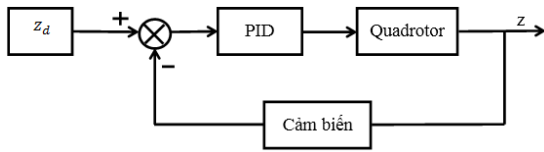
Trong phần này, tác giả tổng hợp bộ điều khiển PID với mục đích khảo sát và đánh giá chất lượng điều khiển trong chế độ ổn định quỹ đạo cho quadrotor. Tổng hợp bộ điều khiển thực hiện theo kênh độ cao.

Xét chế độ ổn định độ cao, trong đó tín hiệu đầu vào kênh z là z_d có dạng hàm bậc thang đơn vị, còn tín hiệu đầu vào kênh x và y tương ứng là $x_d = 0$ và $y_d = 0$ nhằm giảm bớt hiện tượng xen kênh do các kênh điều khiển ảnh hưởng lẫn nhau.

Luật điều khiển cho kênh độ cao có dạng như sau:

$$U_1 = K_p \cdot (z_d - z) + K_i \int (z_d - z) dt + K_d \frac{d(z_d - z)}{dt} \quad (17)$$

Sơ đồ điều khiển theo kênh độ cao được mô tả trong hình 3.

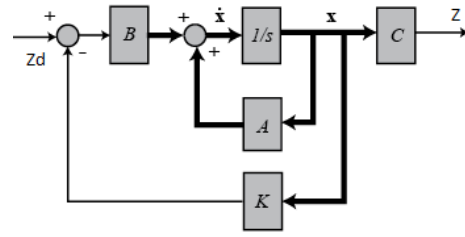


Hình 3. Sơ đồ điều khiển kênh độ cao

2.3. Xây dựng bộ điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính (LQR) cho quadrotor

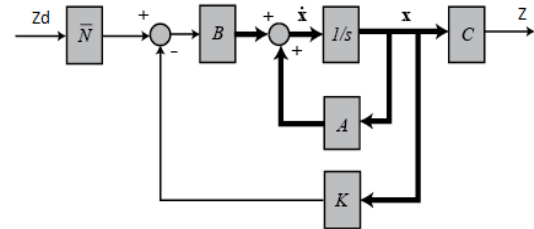
Lý thuyết điều khiển điều khiển LQR là một phương pháp điều khiển mạnh để điều khiển hệ thống tuyến tính được mô tả bằng phương trình trạng thái. Kỹ thuật LQR tạo ra bộ điều khiển vòng kín ổn định với năng lượng cung cấp cho hệ thống là nhỏ nhất.

Hình 4 là mô hình để điều khiển vị trí của quadrotor theo kênh độ cao được xây dựng bằng cách chọn ma trận trạng thái A và B từ dạng không gian trạng thái của mô hình vị trí Z ; và ma trận độ lợi K được tính từ các ma trận trọng lượng Q và R .



Hình 4. Mô hình điều khiển vị trí của quadrotor theo kênh độ cao

Thông thường, đối với hệ thống sử dụng bộ điều khiển LQR sẽ tồn tại sai số xác lập, do vậy ta cần thiết kế thêm khâu bù, khâu bù thực chất là đưa thêm lượng điều khiển tích phân đầu ra để đưa sai số xác lập về không. Khâu bù $\bar{N}$ được xác định bởi hệ số K_{bu} .



Hình 5. Mô hình điều khiển vị trí của quadrotor theo kênh độ cao khi đưa thêm khâu bù

III. Phương pháp nghiên cứu

Quá trình nghiên cứu được tác giả tiến hành theo phương pháp nghiên cứu cơ sở lý thuyết gắn với mô phỏng đánh giá các bộ điều khiển trên phần mềm matlab/simulink.

3.1. Nghiên cứu lý thuyết

- Nghiên cứu lý thuyết mô hình toán của quadrotor và cách biến đổi đưa về dạng mô hình không gian trạng thái tuyến tính.

- Nghiên cứu lý thuyết cách xây dựng các bộ điều khiển PID, LQR.

- Ứng dụng lý thuyết xây dựng bộ điều khiển PID và LQR cho quadrotor theo kênh độ cao.

3.2. Nghiên cứu thực nghiệm

- Kiểm chứng kết quả xây dựng bộ điều khiển PID và LQR cho quadrotor trên phần mềm matlab/simulink. Từ đó, rút ra

ưu, nhược điểm của từng bộ điều khiển và so sánh kết quả của 2 bộ điều khiển khi điều khiển quadrotor theo kênh độ cao.

IV. Kết quả mô phỏng, đánh giá

Với việc xây dựng các bộ điều khiển cho quadrotor trong mục 2.2 và 2.3 của bài báo này, trong mục này tác giả tiến hành tính toán và mô phỏng, đánh giá chất lượng của các bộ điều khiển đó trên phần mềm matlab/simulink.

4.1. Tính toán mô phỏng bộ điều khiển PID

- Bài toán mô phỏng với đầu vào đặt là hàm bậc thang đơn vị Z_d .

- Chọn độ quá điều chỉnh nhỏ hơn 10%, thời gian quá độ nhỏ hơn 0,2 giây, thời gian quá độ nhỏ hơn 0,4 giây, sai số xác lập nhỏ hơn 2%.

Để đáp ứng các chỉ tiêu thiết kế đặt ra cần thay đổi bộ hệ số (K_p , K_i , K_d) cho phù hợp.

Quá trình khảo sát đánh giá:



Hình 6. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển PID kênh độ cao khi $K_p = 1$, $K_i = 1$, $K_d = 1$



Hình 7. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển PID kênh độ cao khi $K_p = 40$, $K_i = 1$, $K_d = 1$

Qua quá trình khảo sát, ta thấy rằng: K_p càng lớn thì tốc độ đáp ứng càng nhanh, sai số xác lập càng nhỏ. K_p càng lớn thì các cực của hệ thống có xu hướng di chuyển ra xa trục thực. Hệ thống càng dao động và độ vọt lố càng cao.



Hình 8. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển PID kênh độ cao khi $K_p = 40$, $K_i = 1$, $K_d = 20$

Khi tăng K_d , ta thấy rằng: K_d càng lớn thì đáp ứng quá độ càng nhanh, độ vọt lố càng nhỏ.



Hình 9. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển PID kênh độ cao khi $K_p = 40$, $K_i = 2$, $K_d = 32$

Khi tăng K_i , ta thấy rằng: K_i càng lớn thì đáp ứng quá độ càng chậm, sai số xác lập càng nhỏ. K_i càng lớn thì độ vọt lố càng cao.

Nhận xét:

- Khâu P, I, D không thể sử dụng độc lập mà phải dùng kết hợp với nhau để tăng tính ổn định của hệ thống.

- Khâu tỷ lệ làm giảm thời gian tăng Tr và sai số ở trạng thái xác lập.

- Khâu tích phân khử được sai số

ở trạng thái xác lập, nhưng làm cho dạng đường cong đáp ứng đầu ra xấu đi.

- Khâu vi phân tăng tính ổn định của hệ thống, giảm quá điều chỉnh và cải tiến dạng đường cong đáp ứng.

- Để đạt được tiêu chuẩn thiết kế đề ra, cần lựa chọn (K_p , K_i , K_d) cho phù hợp. Bằng thực nghiệm, K_p có giá trị khoảng $(0,1 \div 250)$, K_i có giá trị khoảng $(0,1 \div 30)$, K_d có giá trị > 32 .

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & HsQ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} HsR & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Quá trình khảo sát đánh giá:

Bằng thực nghiệm thay đổi các hệ số HsQ , HsR và K_{bu} , ta nhận được các đặc tính quá độ của hệ thống theo kênh độ cao.



Hình 10. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển LQR kênh độ cao khi $HsQ = 10^5$, $HsR = 1$, $K_{bu} = 316,26$

4.2. Tính toán mô phỏng bộ điều khiển LQR

- Chọn đầu vào là hàm bậc thang đơn vị Z_d .

- Chọn độ quá điều chỉnh nhỏ hơn 10%.

- Thời gian tăng nhỏ hơn 0,2 giây.

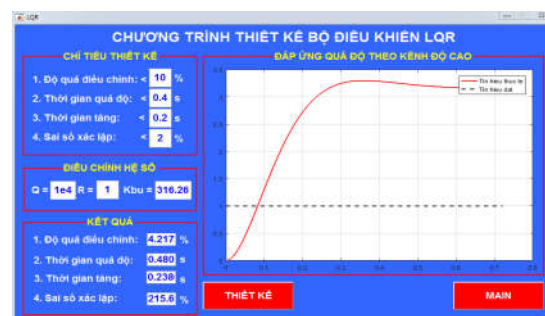
- Thời gian quá độ nhỏ hơn 0,4 giây.

- Sai số xác lập nhỏ hơn 2%.

Tín hiệu điều khiển kênh độ cao Z là U_1 nên ta chọn ma trận Q và R có dạng như sau:



Hình 11. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển LQR kênh độ cao khi R giảm



Hình 12. Đáp ứng quá độ của bộ điều khiển LQR kênh độ cao khi Q giảm

Nhận xét:

Sau quá trình khảo sát, rút ra một số nhận xét sau:

- Tùy theo độ lớn tương đối giữa trọng số Q và R (cụ thể là 2 hệ số HsQ và HsR) mà hệ thống có đáp ứng quá độ và tiêu tổn năng lượng khác nhau. Muốn trạng thái đáp ứng nhanh thì tăng thành phần Q, tương ứng muốn giảm năng lượng thì tăng R.

- Cần điều chỉnh hài hòa các hệ số HsQ, HsR và Kbu để đạt được các chỉ tiêu thiết kế.

V. Kết luận

Bài báo này tập trung nghiên cứu cơ sở lý thuyết về mô hình toán của quadrotor, tiến hành biến đổi, tuyến tính hóa và đưa về mô hình không gian trạng thái. Nghiên cứu sau đó đã tiến hành xây dựng bộ điều khiển PID, LQR điều khiển kênh độ cao và tiến hành mô phỏng, đánh giá kết quả của các bộ điều khiển trên phần mềm Matlab/Simulink. Các kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển thông thường PID và bộ điều khiển tối ưu LQR điều khiển quadrotor đều đạt được các chỉ tiêu chất lượng thiết kế, trong đó bộ điều khiển LQR cho thấy khả năng ưu việt hơn. Nội dung bài báo có thể làm tài liệu tham khảo, dựa trên cách tiếp cận này để xây dựng các bộ điều khiển cho quadrotor với các kênh khác nhau. Đồng thời, bài báo còn là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế chế tạo bộ điều khiển cho quadrotor đáp ứng một số nhiệm vụ cơ bản trong thực tế.

Tài liệu tham khảo:

[1]. Hoàng Văn Huy, Nguyễn Đăng Toàn, Nguyễn Văn Lành, *Điều khiển logic mờ quadrotor*, Tạp chí khoa học và công

nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Tập 59 - Số 4, 2023.

- [2]. Nguyễn Văn Khang, *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2007.
- [3]. Trịnh Lương Miên, *Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển PID vị trí độ cao và ổn định cân bằng cho UAV quadcopter*, Hội nghị Khoa học- Chuyên đề số: Công nghệ và ứng dụng trong lĩnh vực giao thông vận tải, Trường Đại học Giao thông Vận tải, 2023.
- [4]. Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2005.
- [5]. Nguyễn Văn Tiên, Hoàng Xuân Bình, *Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển cho thiết bị bay không người lái 4 cánh quạt*, Tạp chí Khoa học Công nghệ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Số 6, 2022.
- [6]. Tommaso Bresciani, *Modelling, Identification and Control of a quadrotor Helicopter*, Lund University, October 2008.
- [7]. Sevkuthan Kurak, *Control and Estimation of Quadcopter Dynamical Model*, MSc. Thesis, International University of Sarajevo, September 2017.
- [8]. L. Chrif and Z.M. Kadda, *Aircraft control system using LQG and LQR controller with optimal estimation kalman filter design*, Procedia Engineering, 2014.
- [9]. L. M. Argentim, W. C. Rezende, P. E. Santos, and R. A. Aguiar, *Pid, lqr and lqr-pid on a quadcopter platform*, in Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference on. IEEE, 2013.

- [10]. A. A. Mian and W. Daobo, *Modeling and backstepping-based nonlinear control strategy for a 6 dof quadrotor helicopter*, Chinese Journal of Aeronautics, 2008.
- [11]. R. L. Williams, D. A. Lawrence et al., *Linear state-space control systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [12]. M. S. Fadali and A. Visioli, *Digital control engineering: analysis and design*. Academic Press, 2012.
- [13]. L. Guzzella, *Discrete-time control systems*, ETH Zurich, 2009.

SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM FOR QUADROTOR

Phung Dinh Kien[†]

Abstract: *Quadrotor is widely used in monitoring volcanoes forest fires, checking power lines, searching for lost people, disaster rescue, etc. The quadrotor is equipped with four motors and four propellers to control and stabilize the quadrotor's motion, which makes the kinematics model of the quadrotor complex strongly nonlinear. The article focuses on developing a mathematical model of the quadrotor, designing PID and LQR controllers, and modeling and simulation controllers on Matlab/Simulink. The simulation results are given to demonstrate the effectiveness of the controllers.*

Keywords: *Synthesis of the control system, Quadrotor, UAV, LQR, PID.*

[†] *Faculty of Radio Electronic, Air Force Officer's College*