

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN LQR TỰ CHỈNH CHO KÊNH ĐIỀU KHIỂN GÓC PITCH CỦA QUADROTOR

BUILDING A SELF-TUNING LQR CONTROLLER FOR QUADROTOR'S PITCH ANGLE CONTROL CHANNEL

*Phùng Đình Kiên**

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 01/06/2022

Ngày nhận kết quả phản biện đánh giá: 01/12/2022

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/12/2022

Tóm tắt: Bài báo trình bày về xây dựng bộ điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính (LQR) cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor và giải pháp tự chỉnh cho bộ điều khiển này. Đây là một giải pháp nhằm đảm bảo sự ổn định cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor khi tham số hệ thống thay đổi ngẫu nhiên. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển được xây dựng ổn định được hệ thống rất tốt.

Từ khóa: Điều khiển tối ưu tự chỉnh, LQR tự chỉnh, Quadrotor.

Abstract: This paper presents the construction of a linear quadratic regulator optimal controller (LQR) for the pitch angle control channel of the quadrotor and a self-tuning solution for this controller. This is a solution to ensure the stability of the quadrotor pitch angle control channel when the system parameter changes randomly. The simulation results on Matlab-Simulink software show that the built-in controller stabilizes the system well.

Keywords: Self-tuning optimal control, Self-tuning LQR, Quadrotor.

I. Đặt vấn đề

Như chúng ta đã biết đối với các phương pháp điều khiển kinh điển, do cấu trúc đơn giản và bền vững nên các bộ điều khiển PID (tỷ lệ, tích phân, đạo hàm) được dùng phổ biến trong các hệ điều khiển công nghiệp. Nhưng các hệ số của bộ điều khiển PID chỉ được tính toán cho một chế độ làm việc cụ thể của hệ thống, do vậy trong quá trình vận hành luôn phải chỉnh định các hệ số này cho phù hợp với thực

tế để phát huy tốt hiệu quả của bộ điều khiển, thì ta phải biết chính xác các thông số và kiểu của đối tượng cần điều khiển. Hơn nữa, bộ điều khiển này chỉ chính xác trong giai đoạn tuyến tính còn trong giai đoạn phi tuyến thì các phương pháp điều khiển kinh điển không thực hiện được. Những năm gần đây, khoa học kỹ thuật phát triển rất mạnh mẽ, một phương pháp được nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước sử dụng rất nhiều đó là phương pháp

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

điều khiển thích nghi và điều khiển tối ưu. Trong đó phương pháp điều khiển tối ưu khắc phục được các nhược điểm của các bộ điều khiển cổ điển, tuy nhiên việc lựa chọn, tính toán hệ số bù khá phức tạp, đồng thời khi hệ thống thay đổi tham số thì bộ điều khiển cũng sẽ bị ảnh hưởng chất lượng.

Trên cơ sở nghiên cứu, phân tích ưu khuyết điểm của bộ điều khiển tối ưu LQR điều khiển góc pitch của quadrotor, tác giả đã đưa ra giải pháp xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh để tự điều chỉnh thay đổi hệ số bù khi hệ thống thay đổi tham số ngẫu nhiên. Các kết quả mô phỏng trên Matlab-simulink chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển này.

II. Cơ sở lý thuyết

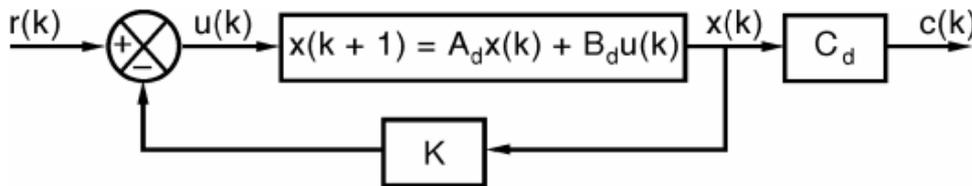
2.1. Lý thuyết xây dựng bộ điều khiển LQR [1][2]

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.

Phương pháp điều khiển này đưa vào hàm chi phí phụ thuộc vào trạng thái của hệ thống động học và đầu vào điều khiển để đưa ra các quyết định điều khiển tối ưu.

Một hệ thống biểu diễn dưới dạng không gian trạng thái như sau:

$$\begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}_d x(k) + \mathbf{B}_d u(k) \\ c(k) = \mathbf{C}_d x(k) \end{cases} \quad (1)$$



Hình 1.1. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển LQR trong miền rời rạc

Tín hiệu điều khiển sẽ là:

$$u(k) = r(k) - \mathbf{K} \cdot x(k) \quad (2)$$

Hàm chi phí cho hệ thống tuyến tính có dạng:

$$\mathbf{J} = \sum_{k=1}^{\infty} x(k)^T \mathbf{Q} x(k) + u(k)^T \mathbf{R} u(k) + 2x(k)^T \mathbf{N} u(k) \quad (3)$$

Trong đó \mathbf{Q} , \mathbf{R} đều là ma trận xác định dương và đối xứng.

Các vector \mathbf{K} được cho bởi LQR là:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d + \mathbf{N}^T) \quad (4)$$

Với \mathbf{P} là một ma trận đối xứng thu được nhờ giải phương trình đại số Riccati:

$$\mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d - \mathbf{P} - (\mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d + \mathbf{N}) (\mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d + \mathbf{N}^T) + \mathbf{Q} = 0 \quad (5)$$

Mục tiêu trong thiết kế tối ưu là chọn \mathbf{K} để giảm thiểu hàm chi phí. Hàm chi phí còn được gọi là chỉ số hiệu suất \mathbf{J} , xác định năng lượng tiêu tốn của hệ thống. Từ hàm chi phí, biến trạng thái $x(k)$ và đầu vào điều khiển $u(k)$ có trọng số trên tổng năng lượng tổn hao của hệ thống. Do đó, nếu \mathbf{J} nhỏ, $x(k)$ và $u(k)$ không thể quá lớn và là một mục tiêu điều khiển. Điều này có nghĩa là $x(k)$ tiến đến zero, khi k tiến ra vô cùng, đảm bảo sự ổn định cho vòng điều khiển kín của hệ thống.

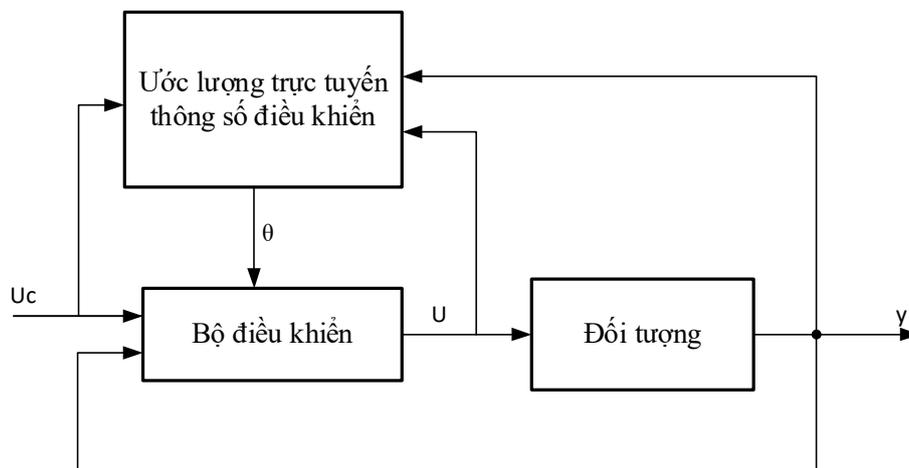
Trong Matlab ta có thể cấu trúc lệnh $[\mathbf{K}, \mathbf{P}, \mathbf{e}] = \text{dlqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N})$ để tính giá trị

của \mathbf{K} . Trong đó tùy theo độ lớn tương đối giữa trọng số \mathbf{Q} và \mathbf{R} mà hệ thống có đáp ứng quá độ và tiêu tốn năng lượng khác nhau. Muốn trạng thái đáp ứng nhanh thì tăng thành phần \mathbf{Q} , tương ứng muốn giảm năng lượng thì tăng \mathbf{R} .

2.2. Xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh

Trong nội dung này tác giả đi xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh trực tiếp.

Hệ điều khiển tự chỉnh trực tiếp: ước lượng trực tiếp thông số bộ điều khiển mà không cần nhận dạng mô hình toán của đối tượng [2].



Hình 2.1. Sơ đồ khối tổng quát hệ thống điều khiển thích nghi tự chỉnh trực tiếp

Trình tự xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh:

- **Bước 1:** Xây dựng bộ điều khiển LQR dựa theo tham số đối tượng.

- **Bước 2:** Lựa chọn giải pháp, tính toán tham số xây dựng bộ tự **điều chỉnh phù hợp**.

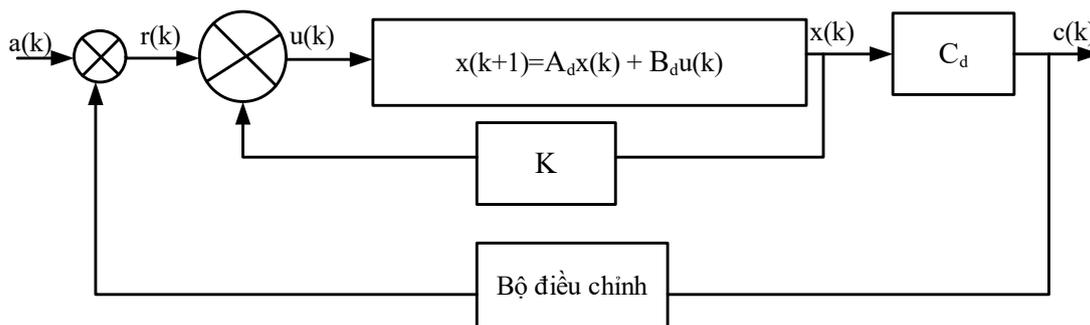
Để bộ điều khiển LQR có thể tự điều chỉnh và cho tín hiệu đầu ra đáp ứng

yêu cầu khi hệ thống thay đổi tham số có các giải pháp sau:

+ Giải pháp 1: điều chỉnh ma trận phản hồi \mathbf{K} ;

+ Giải pháp 2: thay đổi khâu bù tín hiệu vào.

- **Bước 3:** Kiểm chứng mô hình bộ điều khiển



Hình 2.2. Sơ đồ khối bộ điều khiển LQR tự chỉnh

III. Xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor

Trong nội dung này với mục đích xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor do đó tác giả sử dụng mô hình mẫu với hàm truyền kênh chuyển động góc pitch của quadrotor được nghiên cứu trong tài liệu “*Guidance and Trajectory Following of an Autonomous Vision-Guided Micro QuadRotor*” của đại học công nghệ Lisbon [6].

Hàm truyền kênh điều khiển góc pitch [6].

$$TF_{\theta}(s) = \frac{0.2655 \cdot 14.8528^2}{s^2 + 14.195s + 14.8528^2} \quad (6)$$

3.1. Xây dựng điều khiển LQR

- Từ mô hình hàm truyền công thức (6) chuyển sang miền rời rạc với T=0,1s ta được:

$$TF(z) = \frac{0.1626z + 0.0984}{z^2 - 0.2586z + 0.2418} \quad (7)$$

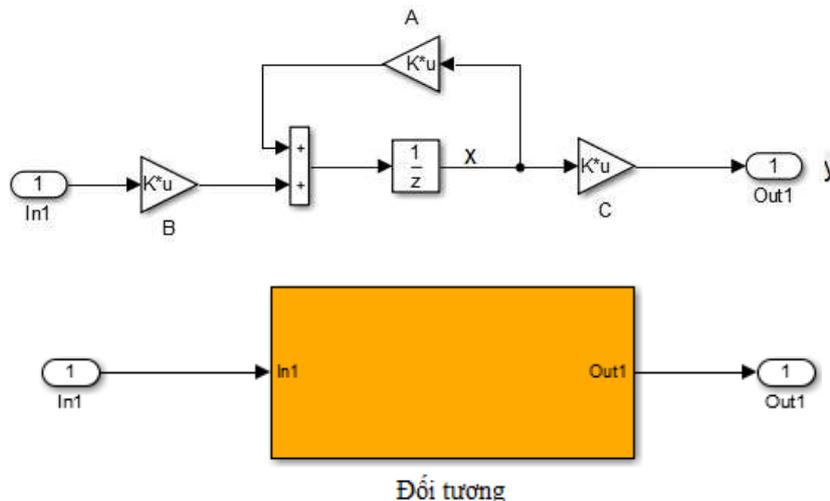
- Chuyển đổi tương sang miền không gian trạng thái sử dụng tính toán trên phần mềm matlab, khi đó ta được các ma trận hệ số **A**, **B**, **C**, **D** của đối tượng và hệ số phản hồi trạng thái **K**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.2586 & -0.2418 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

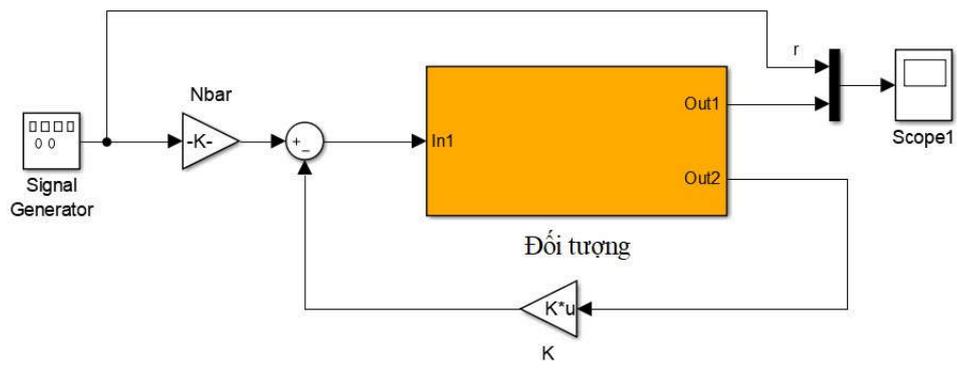
$$\mathbf{C} = [0.1626 \quad 0.0984]; \quad \mathbf{D} = 0.$$

$$\mathbf{K} = [0.0218 \quad -0.0108].$$

- Mô phỏng trên simulink:



Hình 3.1. Mô hình không gian trạng thái kênh điều khiển góc pitch của quadrotor



Hình 3.2. Bộ điều khiển LQR cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor

3.2. Xây dựng bộ tự chỉnh

- Giải pháp : Thay đổi khâu bù tín hiệu vào;

- Trong bài báo này tác giả đưa ra giải pháp thay đổi khâu bù tín hiệu vào mỗi khi hệ thống thay đổi tham số nhờ bộ điều khiển fuzzy logic mờ.

- Đầu vào khối điều khiển mờ là tín ra lấy hiệu phản hồi được chia thành 2 đầu vào tương ứng 2 nửa tín hiệu. Đầu ra là hệ số bù tương ứng.

- Như vậy bộ điều khiển mờ gồm 2 đầu vào 1 đầu ra với các tập mờ tương ứng như sau:

Input 1:

(v1; v2; v3; v4; v5; v6; v7; v8; v9; v10; v11; v12; v13; v14; v15; v16; v17; v18; v19)

Tương ứng các giá trị:

(0.6912; 0.7258; 0.7603; 0.7949; 0.8295; 0.8640; 0.8986; 0.9332; 0.9677;

1.002; 1.037; 1.071; 1.106; 1.141; 1.175; 1.210; 1.244; 1.279; 1.313).

Input 2:

(a1; a2; a3; a4; a5; a6; a7; a8; a9; a10; a11; a12; a13; a14; a15; a16; a17; a18; a19).

Tương ứng các giá trị:

(-1.313; -1.279; -1.244; -1.210; -1.175; -1.141; -1.106; -1.071; -1.037; -1,002; -0.9677; -0.9332; -0.8986; -0.8640; -0.8295; -0.7949; -0.7603; -0.7258; -0.6912).

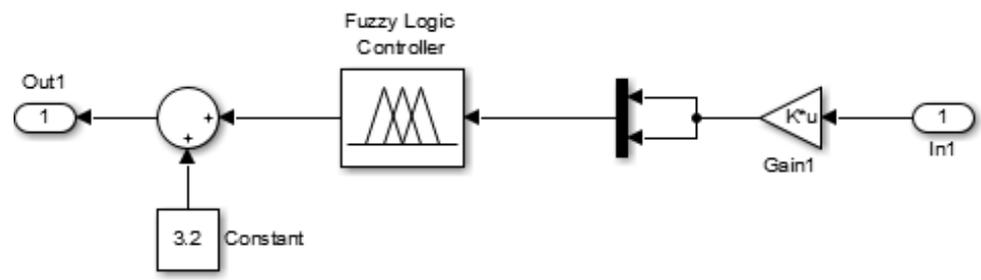
Output:

(dc1; dc2; dc3; dc4; dc5; dc6; dc7; dc8; dc9; dc10; dc11; dc12; dc13; dc14; dc15; dc16; dc17; dc18; dc19).

Tương ứng các giá trị:

(0; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4; 0.45; 0.5; 0.55; 0.6; 0.65; 0.7; 0.75; 0.8; 0.85; 0.9).

- Mô phỏng trên simulink:

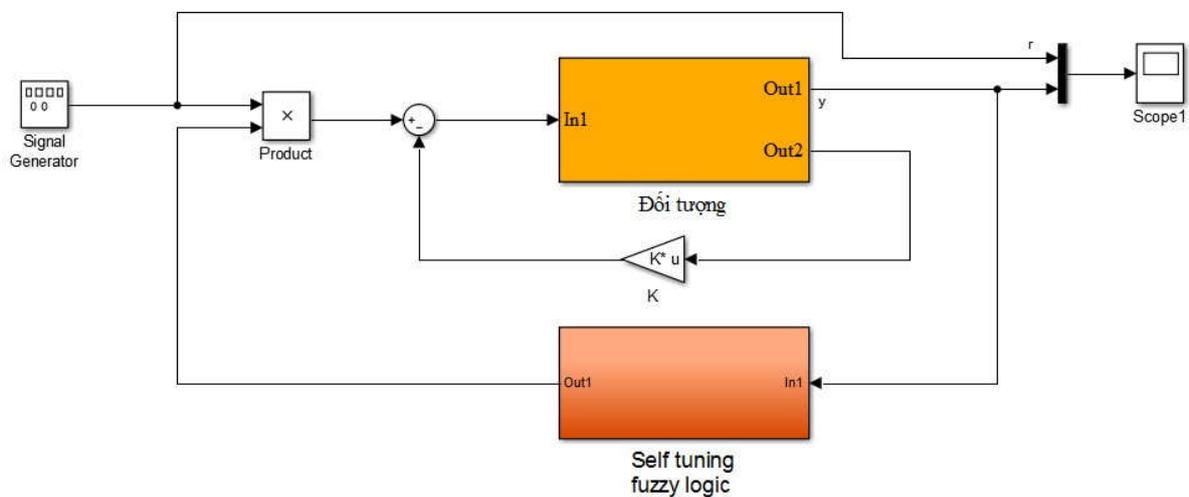




Hình 3.3. Bộ tự chỉnh sử dụng điều khiển mờ

3.3. Xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh

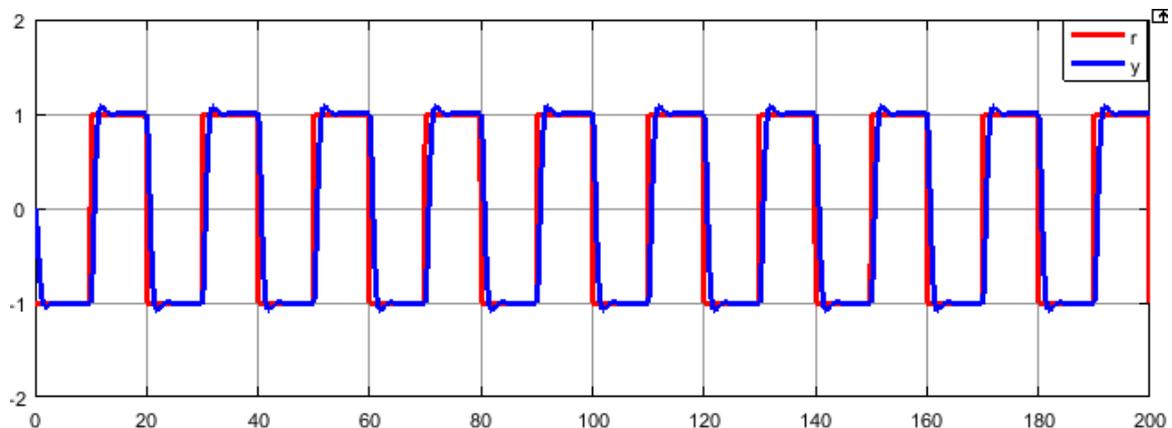
Từ các kết quả xây dựng bộ điều khiển LQR và bộ tự chỉnh ta có sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển LQR tự chỉnh mô phỏng trên simulink.



Hình 3.4. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển LQR tự chỉnh cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor

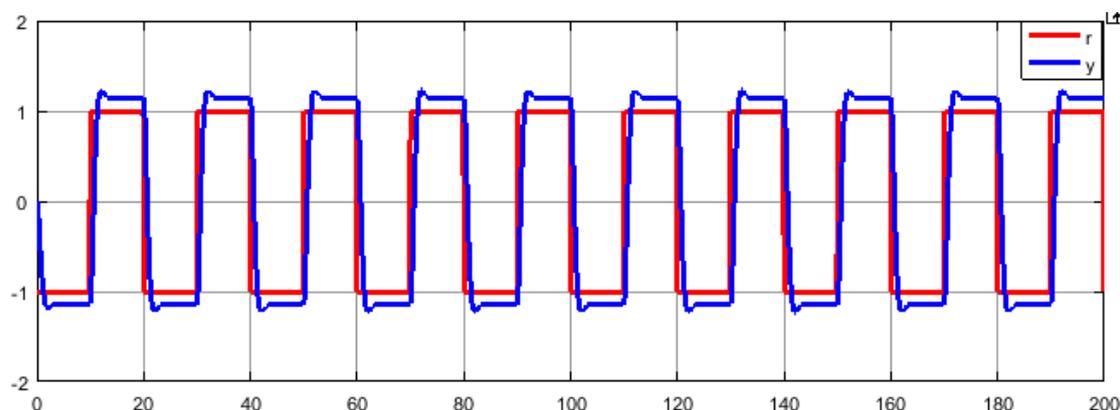
IV. Kết quả mô phỏng

Từ các nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển trong mục 3 chạy chương trình mô phỏng ta có kết quả mô phỏng như sau:



Hình 4.1. Kết quả mô phỏng đáp ứng đầu ra khi sử dụng bộ điều khiển LQR

- Khi cho hệ thống thay đổi tham số ($A+0.01*\text{rand}(1)$, $B+0.01*\text{rand}(1)$, $C+0.01*\text{rand}(1)$) kiểm tra sự làm việc của bộ điều khiển LQR:

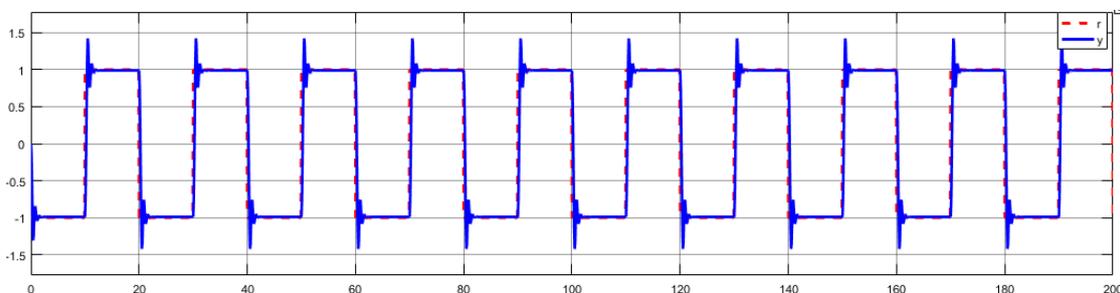


Hình 4.2. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển LQR khi hệ thống có sự thay đổi

Nhận xét: Qua kết quả mô phỏng (hình 4.1, hình 4.2) ta thấy trong điều kiện hệ thống ổn định không có sự thay đổi tham số thì với thuật toán tối ưu của mình bộ điều khiển LQR cho thấy ưu điểm với độ chính xác cao thời gian đáp ứng nhanh. Nhưng khi hệ thống có sự thay đổi tham số vì một lý do nào đó lúc này bộ điều

khiển LQR cho thấy những hạn chế nhất định, khả năng điều khiển kém, biên độ tín hiệu ra không ổn định với sai số đáng kể.

- Khi cho hệ thống thay đổi tham số ($A+0.01*\text{rand}(1)$, $B+0.01*\text{rand}(1)$, $C+0.01*\text{rand}(1)$) kiểm tra sự làm việc của bộ điều khiển LQR tự chỉnh:



Hình 4.3. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển LQR tự chỉnh

Nhận xét: Qua kết quả mô phỏng cho thấy khi sử dụng bộ điều khiển logic mờ điều chỉnh hệ số bù tín hiệu vào khi hệ thống thay đổi thì bộ điều khiển LQR làm việc tương đối tốt với các chỉ tiêu chất lượng đạt yêu cầu đề ra.

V. Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy bộ điều khiển LQR trong điều khiển tự động

là bộ điều khiển tối ưu với nhiều ưu điểm vượt trội so với các bộ điều khiển cổ điển như PID. Tuy nhiên khi hệ thống không ổn định có sự thay đổi tham số, đặc biệt là các vật thể bay như quadrotor các kênh chuyển động thường hay thay đổi tham số ngẫu nhiên, khi đó các bộ điều khiển LQR sẽ không đáp ứng được các yêu cầu về điều khiển và xảy ra sai lệch. Giải pháp đặt ra cho vấn đề này là xây dựng

một bộ tự điều chỉnh bám theo sự thay đổi tham số của đối tượng để điều chỉnh các tham số của bộ điều khiển cho phù hợp. Áp dụng giải pháp vào xây dựng bộ điều khiển LQR tự chỉnh cho kênh điều khiển góc pitch của quadrotor với kết quả mô phỏng cho thấy kết quả tương đối tốt, khi tham số của kênh chuyển động góc pitch thay đổi thì bộ điều khiển sẽ tự điều chỉnh hệ số bù đảm bảo đáp ứng đầu ra luôn bám theo tín hiệu điều khiển đầu vào. Kết quả nghiên cứu hoàn toàn có thể áp dụng vào xây dựng bộ điều khiển cho các chuyển động góc khác của quadrotor (Roll, Yaw) và các hệ thống điều khiển khác.

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Doãn Phước, *Lý thuyết điều khiển nâng cao*, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, Năm 2007.

[2]. Huỳnh Thái Hoàng, *Bài giảng lý thuyết điều khiển nâng cao*, Đại Học Bách Khoa TPHCM, Năm 2014.

[3]. Nguyễn Thị Phương Hà, *Lý thuyết điều khiển tự động*, NXB Đại học Quốc Gia, TP HCM, Năm 2005.

[4]. Nguyễn Như Hiền, *Hệ mờ & Noron trong kỹ thuật điều khiển*, NXB Khoa học tự nhiên & công nghệ, Hà Nội, Năm 2007.

[5]. Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink*, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, Năm 2005.

[6]. S.fernandes, *Guidance and Trajectory Following of an Autonomous Vision-Guided Micro QuadRotor*, Lisbon University of Technology, U.S.A, January, 2011.

**Địa chỉ tác giả: Khoa Vô tuyến điện tử,
Trường Sĩ quan Không quân**

Email: kiensuong9614@gmail.com