

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ CHO ROBOT IN 3D RPP BẰNG THUẬT TOÁN BACKSTEPPING TRÊN CƠ SỞ LOGIC MỜ

DESIGN OF POSITION CONTROLLER FOR RPP 3D PRINTED ROBOT USING BACKSTEPPING ALGORITHM ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

Phí Hoàng Nhã*, Trần Đức Thiện, Phạm Văn Hùng

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: phihoangnha@gmail.com

(Nhận bài / Received: 13/3/2024; Sửa bài / Revised: 11/6/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 12/6/2024)

Tóm tắt - Robot đóng vai trò quan trọng trong các lĩnh vực xã hội và kinh tế, nhất là đối với quá trình tự động hóa sản xuất ở nền công nghiệp hiện đại. Robot nói chung và robot làm nhiệm vụ in với 3 bậc tự do RPP nói riêng là đối tượng nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu, nhất là trong lĩnh vực điều khiển. Bài toán điều khiển chủ yếu với đối tượng này là điều khiển bám quỹ đạo, ổn định vị trí nhằm nâng cao tính chính xác của robot. Phương pháp thiết kế bộ điều khiển sử dụng kỹ thuật Backstepping kết hợp logic mờ nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho robot được trình bày trong bài báo này. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng tiêu chuẩn Lyapunov và các kết quả được kiểm chứng bằng mô phỏng số trên phần mềm Matlab/Simulink. Những kết quả mô phỏng cho thấy, chất lượng của bộ điều khiển thích nghi Backstepping mờ đề xuất trong bài báo đảm bảo khả năng bám quỹ đạo cho robot RPP rất tốt ngay cả khi chịu ảnh hưởng của nhiễu.

Từ khóa - Robot; RPP; Điều khiển; Backstepping; Logic mờ.

1. Giới thiệu

Robot là một thiết bị tự động rất cần thiết trong cuộc sống hiện nay, nó đóng vai trò quan trọng trong nền sản xuất công nghiệp và nông nghiệp [1]. Với robot công nghiệp, chúng làm việc trong nhiều lĩnh vực, ngành nghề khác nhau như công nghiệp dệt may, ô tô, đóng tàu, luyện kim, công nghiệp son phủ,.... Những công việc này yêu cầu độ chính xác cao, tính bền vững và ổn định. Do vậy, yêu cầu bám quỹ đạo trong các bài toán điều khiển cho robot luôn dành được rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu.

Tài liệu nghiên cứu [2] thiết kế điều khiển cho robot bằng thuật toán điều khiển trượt thích nghi trên cơ sở mạng nơ ron nhân tạo, do thuật toán sử dụng mạng nơ ron nhân tạo khiến cho bài toán điều khiển có tính phức tạp, khối lượng tính toán lớn. Công trình [3] đưa ra quy trình thiết kế cơ khí cho cánh tay robot, đồng thời sử dụng thuật toán điều khiển kinh điển PI/PID để điều khiển quá trình di chuyển của robot. Một số công trình [4-7] là những nghiên cứu mới trên robot có 3 bậc tự do, tuy nhiên không phải là loại robot có một khớp quay và hai khớp tịnh tiến (RPP). Một số công trình [8-10] tiến hành nghiên cứu về robot RPP về mặt động lực học, kết hợp điều khiển chuyển động thông thường qua vị trí điều khiển và PLC. Công trình nghiên cứu gần đây nhất [11] đề xuất bộ điều khiển trượt thích nghi mờ điều khiển bám quỹ đạo cho robot RPP, tuy nhiên, chất lượng bám quỹ đạo chưa thực sự thuyết phục và không đề cập đến sự ảnh hưởng của

Abstract - Robot has an important role in social and economic fields, especially in the automated production process in modern industry. Robot in general and robot performing printing tasks with 3 degrees of freedom RPP in particular are the subject of much research attention, especially in the field of control. The main control problem for this object is trajectory tracking and position stabilization to improve the robot's accuracy. The method of designing a controller using Backstepping technique based on fuzzy logic to improve the quality of trajectory tracking for robots is presented in this article. The stability of the system is proven by the Lyapunov criterion and the results are verified through numerical simulation using Matlab/Simulink software. The simulation results show that the quality of the fuzzy Backstepping adaptive controller proposed in the article ensures very good trajectory tracking ability for the RPP robot even when affected by noise.

Key words - Robot; RPP; Control; Backstepping; Fuzzy logic.

nhiều. Như vậy, đối tượng robot có 3 bậc tự do với nhiệm vụ in 3D còn chưa có nhiều công trình nghiên cứu đến, chủ yếu các nghiên cứu đã công bố hoặc là sử dụng các bộ điều khiển cơ bản, thiếu sự đánh giá ảnh hưởng của nhiễu hoặc là đối tượng robot khác về cấu tạo và nhiệm vụ. Kỹ thuật điều khiển Backstepping là một quy trình thiết kế có hệ thống thông qua hàm Lyapunov cho pháp tổng hợp bộ điều khiển thích nghi, ứng dụng cho một lớp các đối tượng phi tuyến. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra ưu điểm của bộ điều khiển Backstepping so với các bộ điều khiển tương đương bao gồm chất lượng điều khiển được cải thiện, tính ổn định cao [12]. Mặt khác, kỹ thuật điều khiển Backstepping là kỹ thuật điều khiển áp dụng cho các đối tượng có tính phi tuyến mạnh, khả năng đáp ứng nhiễu tốt, không có hiện tượng chattering như kỹ thuật điều khiển trượt [13-14]. Vì vậy, với nghiên cứu này, kỹ thuật điều khiển Backstepping được sử dụng để tổng hợp bộ điều khiển cho đối tượng robot RPP có 3 bậc tự do thực hiện in 3D, điều khiển bám quỹ đạo cho từng khớp, kết hợp với thuật toán logic mờ để giảm ảnh hưởng của nhiễu tới hệ thống.

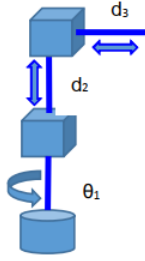
2. Động học của cánh tay robot RPP

2.1. Kết cấu hình học của robot

Cánh tay robot có 3 khớp, khớp đầu tiên là khớp quay, tạo ra chuyển động quay quanh đế; trong khi khớp thứ hai và thứ ba có dạng hình trụ, tạo ra chuyển động tịnh tiến

¹ Ha Noi University of Industry, Vietnam (Phi Hoang Nha, Tran Duc Thien, Pham Van Hung)

(Hình 1). Robot này được ứng dụng trong lĩnh vực in 3D [8] nên được gọi là robot in 3D.



Hình 1. Chuyển động của các khớp trong robot RPP

Việc đo lường vị trí và chuyển động trong robot có mối quan hệ ràng buộc nhau. Do đó, hệ tọa độ phải được quy ước trước tiên và đầy đủ, bao gồm:

- Bước 1: xây dựng hệ tọa độ đầu tiên (X_0, Y_0, Z_0) là vị trí ban đầu của cánh tay robot.
- Bước 2: đặt gốc tọa độ ở vị trí bất kỳ trên trục z_0 , các trục x_0 và y_0 được chọn bất kỳ.
- Bước 3: xác định gốc tọa độ o_i , nơi mà z_i và z_{i-1} cắt nhau.
- Bước 4: thiết lập x_i dọc theo phương pháp tuyến chung giữa z_{i-1} và z_i qua o_i .
- Bước 5: thiết lập y_i .
- Bước 6: thiết lập khung hiệu kết thúc $o_n x_n y_n z_n$.
- Bước 7: tạo bảng tham số liên kết $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$.
- Bước 8: lập ma trận biến đổi thuần nhất A_i .
- Bước 9: $T_n^o = A_1 \dots A_n$.

Hệ tọa độ này được biểu diễn chi tiết ở Hình 2. Các hệ tọa độ liên kết thể hiện như sau: vị trí O_0 dọc theo z_0 cũng như hướng của trục x_0 tùy ý. Trục x_0 được chọn theo hướng của mặt phẳng và tiếp đến là trục x_1 được chọn theo hướng của mặt phẳng khi $\theta_1 = 0$. Trục z giữa z_1 và z_2 cắt nhau và o_2 được đặt tại góc giao nhau. Hướng của x_2 được chọn song song với x_1 , với điều kiện là $\theta_2 = 0$. Tọa độ cuối cùng, hệ tọa độ thứ 3 được chọn ở cuối liên kết 3 như Hình 2.

Các tham số liên kết có thể được tóm tắt dựa trên hệ tọa độ thuận như sau:

- a_i là khoảng cách dọc theo x_i từ o_i đến giao điểm của các trục x_i và z_{i-1} .
- d_i là khoảng cách dọc theo z_{i-1} từ o_{i-1} đến giao điểm của trục x_i và z_{i-1} . d_i có giá trị nếu khớp i có dạng hình trụ.
- α_i là góc giữa x_{i-1} và x_i đo được quanh trục z_{i-1} .
- θ_i là góc giữa x_{i-1} và x_i đo được quanh z_{i-1} . θ_i có giá trị nếu khớp i quay.

2.2. Động học của robot

Tất cả các khớp có thể được biểu diễn bằng bốn tham số được giới thiệu ở mục 2.1 dưới dạng tọa độ từ phép biến đổi hệ tọa độ, và cần phải có hệ thống để phân tích hệ quy chiếu. Các quy ước trong việc triển khai robot để chọn các hệ quy chiếu là quy ước Denavit-Hartenberg (hệ trục tọa độ D-H). Quy ước này đã sắp xếp việc chuyển đổi từng liên kết như dưới đây [15].

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Giá trị của bốn thông số này được tóm tắt dựa trên hệ trục tọa độ D-H. Bảng 1 là bảng D-H của robot, a là khoảng cách giữa 2 khớp nối.

Bảng 1. Bảng D-H của RPP

Khớp	a_i (mm)	α_i (độ)	d_i (mm)	θ_i (độ)
1	0	0	d_1	θ_1
2	0	-90	d_2	0
3	0	0	d_3	0

Toàn bộ các khớp của robot được điều khiển bởi động cơ, động cơ quay và trực tiếp tạo ra chuyển động quay góc θ_1 và cũng chuyển đổi sang chuyển động dọc trục d_2, d_3 . Từ Bảng 1, ta biết được tham số θ_1, d_2, d_3 là các biến khi các hệ quy chiếu của robot đã được thiết lập. Sự đồng nhất chuyển đổi giữa mỗi hai hệ tọa độ được phân tích. Nếu ta đưa ra các giá trị cho từng tham số, robot sẽ di chuyển và sẽ đi đến vị trí nhất định.

Các tham số được biểu thị trong bảng, ma trận A và T tương ứng được biểu diễn dưới đây:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

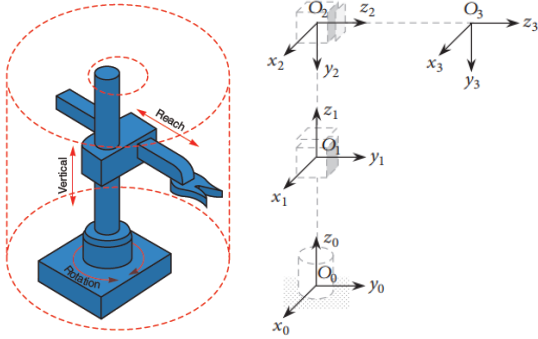
$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_0 = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & -s_1 d_3 \\ s_1 & 0 & c_1 & c_1 d_3 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Mô hình toán của cánh tay robot RPP

Các phương trình toán học mô tả robot 3 bậc tự do được thiết lập từ các phương trình vật lý mô tả theo hướng và vị trí của động học chất điểm ở không gian ba chiều trong hệ quy chiếu xác định [16]. Do vậy, nội dung trong phần 3 trình bày tóm lược hệ phương trình toán học của robot RPP có 3 bậc tự do dựa trên nghiên cứu [11].

Cấu trúc của robot RPP in 3D gồm có ba khớp chuyển

động, được biểu diễn bằng ma trận $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, trong đó khớp đầu tiên là khớp xoay q_1 và hai khớp tiếp theo có chuyển động tịnh tiến lần lượt là q_2 và q_3 . Theo cấu trúc này, hình không gian hoạt động của robot RPP in 3D có hình dạng trụ tròn như biểu diễn ở Hình 2.



Hình 2. Hệ quy chiếu của Robot RPP [11]

Với robot RPP in 3D, mô hình toán học được xây dựng từ mối quan hệ giữa các biến trạng thái của robot và các lực hoặc mô men đặt lên từng khớp, hệ phương trình kinh điển Euler-Lagrange được sử dụng. Phương trình có dạng [11]:

$$M(\underline{q}, \underline{\dot{q}})\underline{\ddot{q}} + C(\underline{q}, \underline{\dot{q}})\underline{\dot{q}} + G(\underline{q}) = \underline{u} \quad (3)$$

Ở đó véc tơ $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ trạng thái tương ứng các khớp [1 2 3], đạo hàm cấp một $\underline{\dot{q}}$ và đạo hàm cấp hai $\underline{\ddot{q}}$ theo thời gian, véc tơ $\underline{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ các tín hiệu của bộ điều khiển cho từng khớp. Ma trận $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính xác định dương và đối xứng. Ma trận $C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là giá trị đại diện cho thành phần tương hỗ và thành phần ly tâm, véc tơ $G \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ đại diện giá trị gia tốc trọng trường. Từ phương trình Euler-Lagrange và theo [11], ta có được mô hình toán học của robot in 3D có 3 bậc tự do RPP như sau:

$$\begin{cases} (q_3^2 (m_1 + m_2 + m_3) + J)\ddot{q}_1 + 2q_3 (m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}_1\dot{q}_3 = u_1 \\ (m_2 + m_3)\ddot{q}_2 + (m_2 + m_3)g = u_2 \\ m_3\ddot{q}_3 - q_3 (m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}_1^2 = u_3 \end{cases} \quad (4)$$

(4) được biểu diễn gọn như sau:

$$\bar{M}\underline{\ddot{q}} + \underline{f} = \underline{u} \quad (5)$$

$$\text{với } \bar{M} = \begin{bmatrix} (q_3^2 (m_1 + m_2 + m_3) + J) & 0 & 0 \\ 0 & (m_2 + m_3) & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix},$$

$$\underline{f} = \begin{bmatrix} 2q_3 (m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}_1\dot{q}_3 \\ (m_2 + m_3)g \\ -q_3 (m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}_1^2 \end{bmatrix}$$

Mô hình (5) được dùng để tổng hợp bộ điều khiển trong phần tiếp theo của bài báo.

4. Thuật toán điều khiển Backstepping thích nghi mờ cho robot RPP in 3D

4.1. Tổng hợp bộ điều khiển Backstepping cho robot

Đặt biến trạng thái

$$\begin{aligned} z_1 &= e = q - r \\ z_2 &= \dot{q} + \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

với e là giá trị sai lệch trong điều khiển và r là giá trị đặt.

Chọn hàm Lyapunov xác định dương:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (7)$$

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (z_2 - \alpha - \dot{q}_d)$$

Chọn $\alpha = a_1 z_1 - \dot{q}_d$ với $a_1 > 0$ thì:

$$V_q = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -a_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -a_1 z_1^2 + z_2 \left(z_1 + \frac{1}{M} u - \frac{\bar{f}}{M} + \dot{\alpha} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Chọn tín hiệu điều khiển:

$$u = -\bar{M} (z_1 + a_1 z_2 + \alpha) + \bar{f} \quad (9)$$

Khi đó:

$$\dot{V}_q = -a_1 z_1^2 - a_1 z_2^2 < 0 \quad (10)$$

Kết luận: đạo hàm của V là âm, vì vậy theo định lý Lyapunov hệ thống trên là ổn định với giá trị sai số điều khiển hội tụ về 0.

Các bộ tham số điều khiển a_2 và a_3 được xác định tương tự.

4.2. Thuật toán điều khiển Backstepping thích nghi mờ cho robot

Bộ điều khiển Backstepping được thiết kế sẽ đảm bảo cho robot bám theo quỹ đạo cho trước. Tuy nhiên, trong quá trình robot làm việc ở các điều kiện thực tế khác nhau sẽ không tránh khỏi một số tác động do nhiễu ngoài gây ra làm ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống. Với mục đích linh hoạt hóa khả năng điều chỉnh của bộ điều khiển, thuật toán mờ được đề xuất nhằm hiệu chỉnh các tham số của bộ điều khiển sao cho đáp ứng tốt vị trí và tốc độ thay đổi trong hệ thống.

Trong bộ điều khiển, tham số a_1, a_2, a_3 có dạng ma trận đường chéo: $A = \text{diag}([a_1; a_2; a_3])$. Giả sử cần chỉnh định tham số a_1 của khớp một, ta sử dụng tín hiệu sai lệch điều khiển của khớp thứ nhất $e_1 = q_1 - r_1$ và đạo hàm của sai lệch theo thời gian \dot{e}_1 . Đồng thời, tham số a_2 và a_3 cũng được chỉnh định dựa theo tín hiệu sai lệch điều khiển tương ứng với khớp thứ 2 và 3.

Để chỉnh định được tham số a_1 cần thực hiện theo ba giai đoạn, bao gồm: giai đoạn mờ hóa, giai đoạn chỉnh định luật mờ và giai đoạn giải mờ. Trong bước một, tập mờ được xây dựng dựa trên tập vũ trụ của biến đầu vào e_1 , sau đó xây dựng các tập mờ bao hàm phạm vi giá trị của e_1 gồm: Negative (N), Zero (Z) và Positive (P) sử dụng dạng hàm liên thuộc là dạng tam giác (Hình 3). Tập mờ cho biến đầu

vào đạo hàm sai lệch \dot{e}_1 được xây dựng tương tự. Mô hình mờ được sử dụng theo mô hình Sugeno [17-18], hàm đầu ra với tên được số hóa là $[N \ Z \ P]$ gồm ba hàm là hằng số tương ứng với các giá trị $[a_1 \ a_2 \ a_3]$. Bước hai là bước chỉnh định mờ sẽ được tiến hành dựa theo luật:

$$R^i: \text{ Nếu } e_1 \text{ là } A_i^1 \text{ và } \dot{e}_1 \text{ là } A_i^2 \text{ thì } a \text{ là } B_i$$

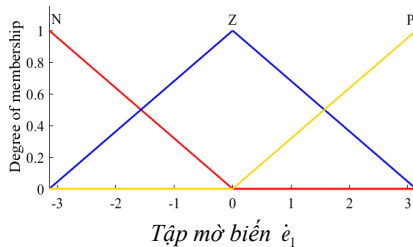
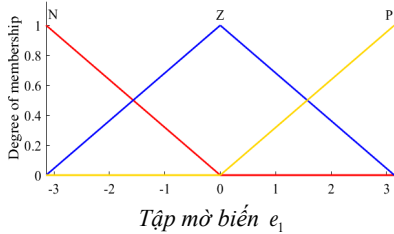
với $i = 1, 2, \dots, 9$ và R^i là luật chỉnh định thứ i , A_i^1 , A_i^2 và B_i sẽ đại diện cho các tập mờ đầu vào và hàm đầu ra tương ứng (Bảng 2). Bước ba là giải mờ theo công thức WTAVER để tìm giá trị a , như sau:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^9 \bar{a}_i (\mu_{A_i^1}(e_1) \cdot \mu_{A_i^2}(\dot{e}_1))}{\sum_{i=1}^9 (\mu_{A_i^1}(e_1) \cdot \mu_{A_i^2}(\dot{e}_1))} \quad (11)$$

với \bar{a}_i là giá trị hằng số tương ứng của hàm đầu ra B_i .

Bảng 2. Luật mờ xác định tham số a_1

a_1		e_1		
		N	Z	P
\dot{e}_1	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

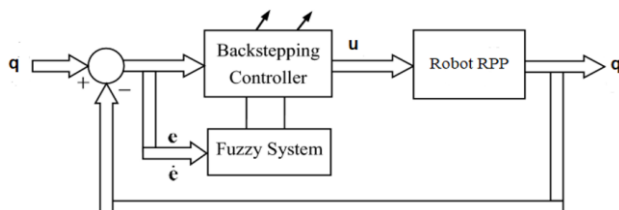


Hình 3. Mờ hóa các biến đầu vào

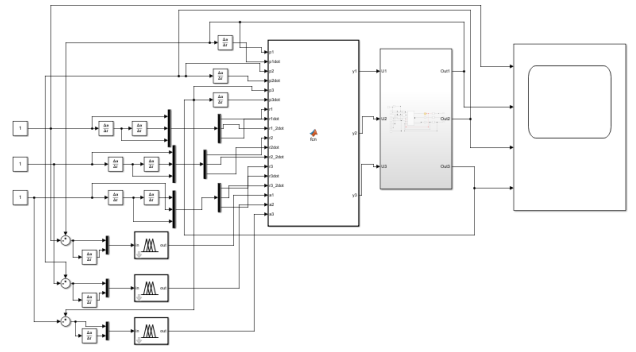
Thực hiện chỉnh định a_2 và a_3 một cách hoàn toàn tương tự.

4.3. Cấu trúc hệ thống điều khiển robot RPP

Để tổng hợp bộ điều khiển theo kỹ thuật Backstepping, biến cần điều khiển chính là vị trí của các khớp, gồm: khớp 1 quay, khớp 2 và khớp 3 chuyển động tịnh tiến. Cấu trúc của hệ thống điều khiển được biểu diễn ở Hình 4, sơ đồ thực hiện hệ thống trên Matlab/Simulink như Hình 5.



Hình 4. Cấu trúc hệ thống điều khiển Backstepping-Fuzzy



Hình 5. Cấu trúc hệ thống điều khiển thích nghi Backstepping mờ trên Simulink

Bảng thông số robot RPP và tham số bộ điều khiển được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Thông số đối tượng và tham số bộ điều khiển

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Chú thích	Tham số bộ điều khiển
m_1	1	kg	Khối lượng của khớp 1	$\begin{bmatrix} N_1 & Z_1 & P_1 \\ N_2 & Z_2 & P_2 \\ N_3 & Z_3 & P_3 \end{bmatrix}$
m_2	1	kg	Khối lượng của khớp 2	
m_3	1	kg	Khối lượng của khớp 3	
g	9,8	m/s ²	Gia tốc trọng trường	$= \begin{bmatrix} 20 & 15 & 20 \\ 50 & 45 & 50 \\ 7 & 5 & 7 \end{bmatrix}$
l_2	1	m	Chiều dài của khớp 2	
l_3	1	m	Chiều dài của khớp 3	
J	0,33	kg.m ²	Mô men quán tính của vật m so với khớp 3	

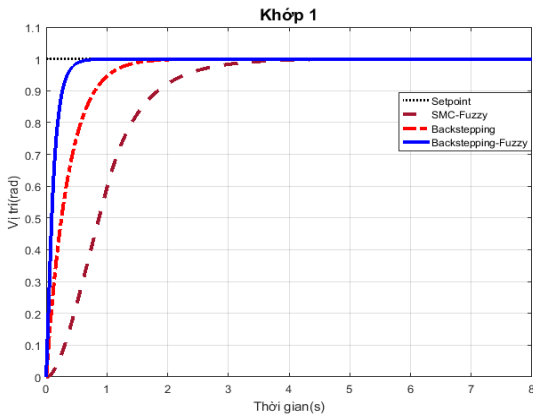
5. Mô phỏng kiểm chứng

Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink được thực hiện với nhiều kịch bản khác nhau nhằm đánh giá chất lượng của bộ điều khiển thích nghi Backstepping mờ (Backstepping-Fuzzy) so với bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển thích nghi trượt mờ (SMC-Fuzzy) [11]. Các kết quả mô phỏng đánh giá chất lượng bộ điều khiển trượt và trượt thích nghi mờ đã được thực hiện ở nghiên cứu [11], sau đây, nhóm tác giả tiến hành so sánh bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ với các bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển trượt thích nghi mờ đã triển khai trong nghiên cứu [11] này.

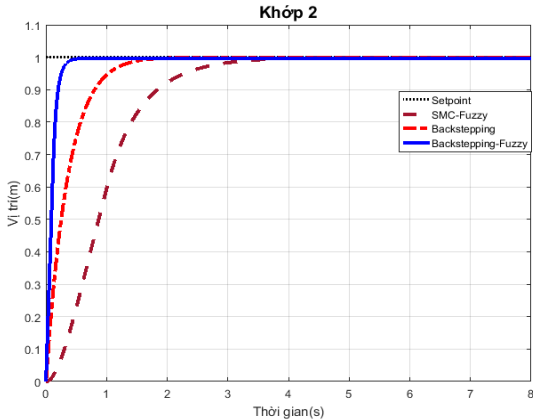
Trường hợp với giá trị đặt là hằng số, đáp ứng đầu ra của các khớp 1, 2, 3 được thể hiện lần lượt ở Hình 6, 7, 8. Các chỉ tiêu chất lượng được biểu diễn ở Bảng 4.

Bảng 4. Các chỉ tiêu chất lượng điều khiển của khớp 3 trường hợp chưa xét đến nhiễu

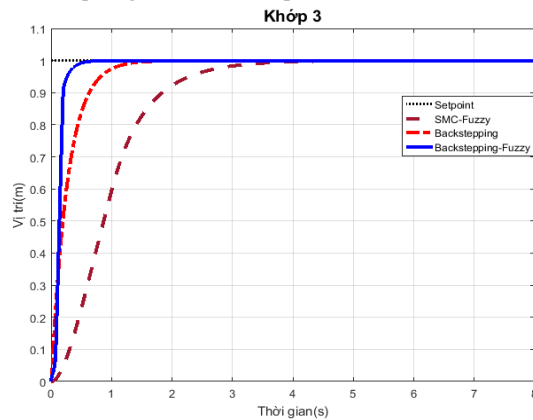
	Backstepping-Fuzzy	Backstepping	SMC-Fuzzy
Độ quá điều chỉnh	0%	0%	0%
Thời gian quá độ	0,3s	0,8s	2,5s
Sai số xác lập	0	0	0



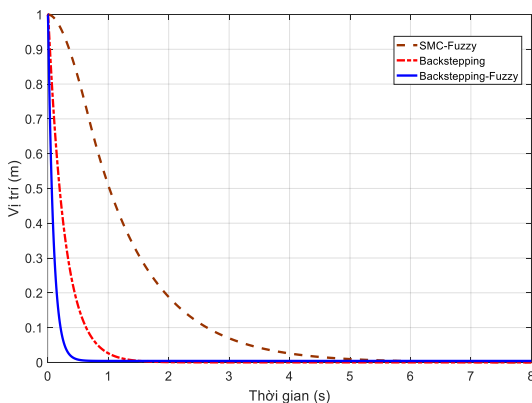
Hình 6. Đáp ứng đầu ra với khớp 1 khi tín hiệu đặt là hằng số



Hình 7. Đáp ứng đầu ra với khớp 2 khi tín hiệu đặt là hằng số



Hình 8. Đáp ứng đầu ra với khớp 3 khi tín hiệu đặt là hằng số

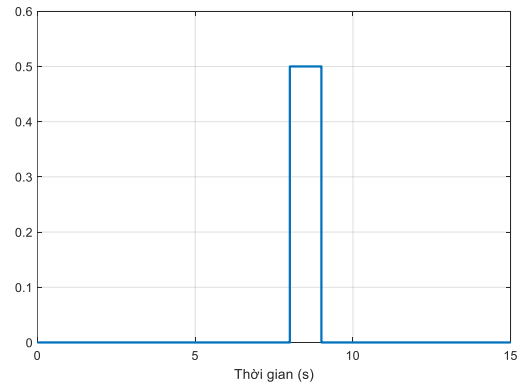


Hình 9. Sai số của khớp 2 so với giá trị đặt

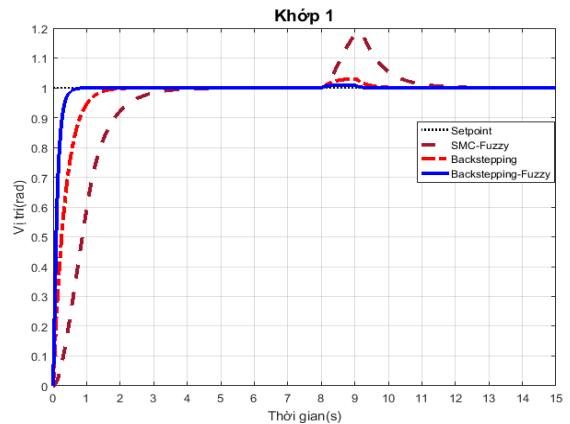
Hình 9 là sai số của khớp 2 so với giá trị đặt (sai số của khớp 1 và 3 được xác định tương tự). Mô phỏng sai số cho thấy, bộ điều khiển Backstepping-Fuzzy có sai số tiến về 0 nhanh nhất, sau đó đến bộ Backstepping và SMC-Fuzzy. Điều này chứng tỏ khả năng bám quỹ đạo của bộ điều khiển Backstepping-Fuzzy là nhanh và chính xác nhất.

Kết quả ở các Hình 6, 7 và 8 cho thấy, khả năng bám của các khớp 1, 2, 3 khi sử dụng bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ là tốt hơn nhiều so với bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển trượt thích nghi mờ.

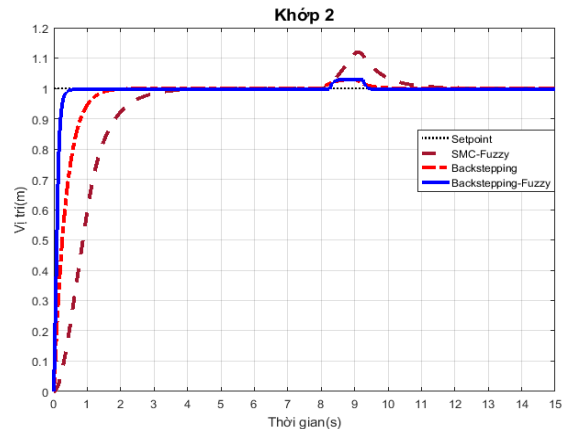
Tương tự, trường hợp có nhiều điều khiển tác động ở thời điểm xác lập 8s (Hình 10), đáp ứng đầu ra của các khớp được biểu diễn ở Hình 11, 12 và 13. Bảng 5 là bảng thông số chất lượng điều khiển của hệ thống khi xét đến nhiều.



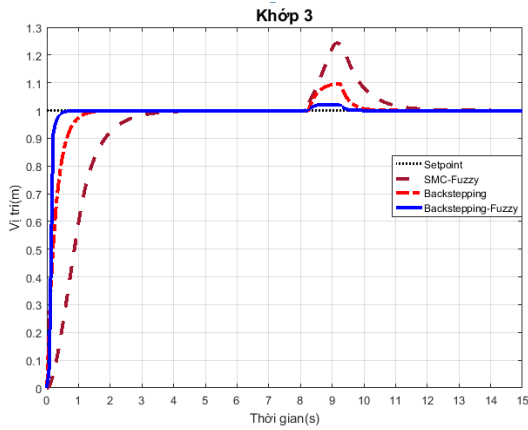
Hình 10. Nhiều xung



Hình 11. Đáp ứng đầu ra với khớp 1 khi có nhiễu



Hình 12. Đáp ứng đầu ra với khớp 2 khi có nhiễu

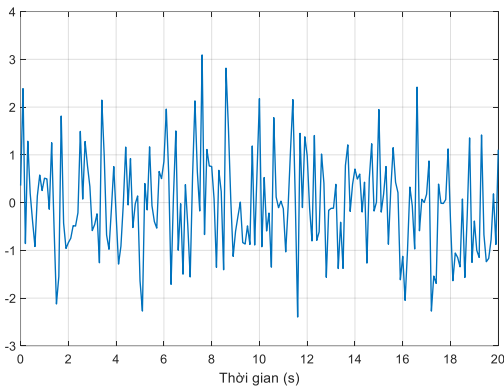


Hình 13. Đáp ứng đầu ra với khớp 3 khi có nhiễu

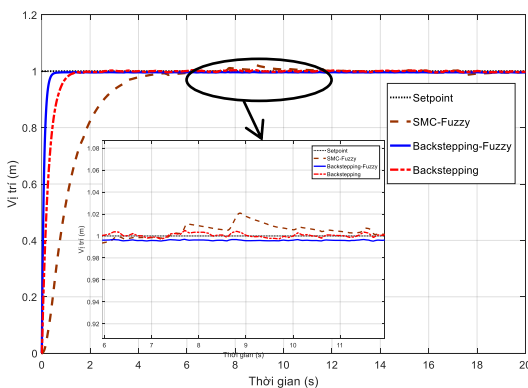
Bảng 5. Các chỉ tiêu chất lượng điều khiển của khớp 3 trường hợp xét đến nhiễu ở 8s

	Backstepping-Fuzzy	Backstepping	SMC-Fuzzy
Độ quá điều chỉnh	0%	10%	25%
Thời gian quá độ	0s	1,8s	2,3s
Sai số xác lập	0	0	0

Trường hợp nhiễu ồn trắng ảnh hưởng đến tín hiệu điều khiển (Hình 14), đáp ứng đầu ra của khớp 3 được thể hiện ở Hình 15 (các khớp 1 và 2 tương tự). Độ bám của đáp ứng với bộ điều khiển Backstepping-Fuzzy tốt hơn nhiều, ít dao động so với hai bộ điều khiển còn lại.



Hình 14. Nhiễu ồn trắng



Hình 15. Đáp ứng đầu ra với khớp 3 khi có nhiễu ồn trắng

Khi có nhiễu tác động, bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ vẫn khẳng định chất lượng điều khiển tốt khi

độ quá điều chỉnh rất nhỏ, thời gian quá độ ngắn hơn so với bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển trượt thích nghi mờ. Như vậy, với robot RPP in 3D này, bộ điều khiển thích nghi Backstepping trên cơ sở logic mờ đề xuất trong bài báo là phù hợp hơn so với bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển trượt thích nghi mờ.

6. Kết luận

Bài báo cho thấy, chất lượng điều khiển của bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ là tốt hơn so với bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển trượt thích nghi mờ. Khả năng bám quỹ đạo của ba khớp sử dụng bộ Backstepping thích nghi mờ là nhanh và chính xác hơn ngay cả khi chịu sự ảnh hưởng của nhiễu. Bộ điều khiển Backstepping trên cơ sở logic mờ là bộ điều khiển phù hợp cho đối tượng robot 3 bậc tự do RPP in 3D trong bài toán điều khiển bám quỹ đạo, hoàn toàn có thể áp dụng triển khai trong các hệ vật lý thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. T. Phuc, *Industrial robotics*, Science and Technics Publishing House, 2006.
- [2] T. H. Nguyen, P. X. Minh, and N. C. Khoa, "Robust adaptive neural networks sliding mode control for three-freedom robot", *Viet Nam Journal of Science and Technology*, vol. 52, no. 5, pp. 541-548, 2014.
- [3] N. Q. Vi, "Design, manufacture and control a 3-freedom robot arm", Hai Phong University of Management and Technology, 2012.
- [4] T. D. Hoa, N. V. Khiem, and T. D. Thien, "Design, simulation, fabrication and control a 3-DOF planar robotic manipulator", *Journal of technical education science, HCM city university of science and education*, vol. 16, no. 3, pp. 40-47, 2021.
- [5] H. S. Kim and J. B. Song, "Low-cost robot arm with 3-DOF counterbalance mechanism", *IEEE, ICRA*, pp. 4183-4188, 2013.
- [6] A. F. Amer, E. A. Sallam, and W. M. Elawady, "Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators", *Elsevier*, vol. 11, no. 8, pp. 4943-4953, 2011.
- [7] A. Deneve, S. Moughamir, L. Afilal, and J. Zaytoon, "Control system design of 3-DOF upper limbs rehabilitation robot", *Elsevier*, vol. 89, no. 2, pp. 202-214, 2008.
- [8] F. A. Alamsyah, "The kinematics of robotic Arm manipulators cylindrical robot RPP type for FFF 3D print using Scilab", *International conference on Mechanical Engineering Research and Application*, 494 (1), pp. 1-8, 2019.
- [9] B. Laurean and T. Emanoil, "New Solution for Telescopic Robotic Arm", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 658, pp. 557-562, 2014.
- [10] B. Laurean, "Using the Microcontroller and the PLC in a RPP robot control", *Advanced Materials Research*, vol. 463-464, pp. 1721-1724, 2012.
- [11] P. H. Nha and N. D. Hai, "Adaptive fuzzy sliding mode control for three degrees of freedom robot RPP", *Journal of Science & Technology, Ha Noi University of Industry*, vol. 58, no. 6B, pp. 19-22, 2022.
- [12] A. R. Benaskeur and A. Desblens, "Backstepping-based adaptive PID control", *IEE Proceedings Control Theory*, vol. 149, no. 1, pp. 54-59, 2002.
- [13] M. Morawiec, P. Strankowski, A. Lewicki, J. Guzinski, and F. Wilczynski, "Feedback control of Multiphase induction machines with Backstepping Technique", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4305-4314, 2020.
- [14] J. Huang, T. Zhang, Y. Fan, and J. Sun, "Control of rotary inverted pendulum using model free backstepping technique", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96965-96973, 2019.
- [15] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*, John Wiley & Sons, 2008.
- [16] A. J. Kurdila and P. B. Tzvi, *Dynamics and Control of Robotic Systems*, Wiley, 2020.
- [17] M. Sugeno, *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science Pub. Co, 1985.
- [18] H. Li, J. Wang, H. Du, and H. R. Karimi, "Adaptive sliding mode control for Takagi-Sugeno fuzzy systems and its applications", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 531-542, 2018.