

Nghiên cứu mô hình điều khiển robot ba bậc tự do bằng hồi tiếp tuyến tính hóa

Huỳnh Minh Vũ

Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mục tiêu áp dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa để điều khiển robot ba bậc tự do. Động lực học robot ba bậc tự do là hệ thống MIMO (multi-input multi-output) có tính phi tuyến phức tạp, yêu cầu cần có một bộ điều khiển tiên tiến để điều khiển robot bám theo quỹ đạo đặt trước. Bài toán động học thuận và động học nghịch cũng được trình bày dựa trên phương pháp Denavit-Hartenberg để chuyển đổi quỹ đạo đặt ra từ không gian Descartes sang không gian khớp và ngược lại. Kết quả mô phỏng cho thấy tính bền vững của hệ thống khi có tác động nhiễu và đáp ứng vị trí các khớp của robot có thời gian xác lập là 0.25(s), không dao động và sai số xác lập bị triệt tiêu.

Từ khóa: động lực học robot, Denavit-Hartenberg (DH), điều khiển hệ phi tuyến, mô hình hóa hệ thống, hồi tiếp tuyến tính hóa

1. GIỚI THIỆU

Robot công nghiệp là một trong những đối tượng được sử dụng phổ biến và mang lại hiệu quả cao trong sản xuất, sinh hoạt,...nhưng đồng thời cũng là đối tượng có tính phi tuyến mạnh, các tham số bất định lớn và chịu nhiều tác động của nhiễu. Song song với việc nâng cao độ chính xác trong các khâu lắp ghép cơ khí thì điều khiển cũng là một vấn đề hết sức quan trọng để cải thiện đáng kể chất lượng làm việc của robot [1]. Trong công nghiệp, tay máy thường được sử dụng rộng rãi trong các việc lắp ráp, hàn, tiện, sơn và một số ứng dụng công nghiệp khác. Các ứng dụng này cần vạch được hướng di chuyển, quỹ đạo và thiết kế bộ điều khiển. Hoạch định quỹ đạo bao gồm xác định đường cong trong không gian làm việc của tay máy, kết hợp với các điều kiện đầu và cuối cùng là xác định vị trí tại cơ cấu chấp hành đầu cuối [2].

Hiện nay, có nhiều phương pháp điều khiển robot đã được công bố và áp dụng thành công. Tuy nhiên, đến nay bài toán điều khiển robot vẫn luôn dành được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trong và ngoài nước. Cụ thể, phương pháp điều khiển trượt sử dụng mô hình

mờ nơ-ron được kiểm chứng phù hợp để điều khiển mô hình robot ba bậc tự do trong bài báo [3]. Trong đó, tác giả đã sử dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để ước lượng trực tuyến các hàm phi tuyến trong luật điều khiển và sử dụng logic mờ để ước lượng biên độ của luật điều khiển dựa vào lý thuyết ổn định Lyapunov. Hơn nữa, sự kết hợp giữa logic mờ và bộ điều khiển trượt cũng mang lại hiệu quả điều khiển với các hệ phi tuyến. Trong đó, logic mờ đóng vai trò như bộ giám sát để điều chỉnh mặt trượt của bộ điều khiển trượt áp dụng cho mô hình tay máy ba bậc tự do [4].

Dựa trên những kết quả nghiên cứu trên, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp để điều khiển vị trí các biến khớp của robot dựa trên phương trình động lực học bằng điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa. Phương pháp điều khiển này được thiết kế tương đối đơn giản nhưng mang hiệu quả cao khi điều khiển đối tượng robot ba bậc tự do. Bên cạnh đó, việc đánh giá chất lượng điều khiển trong nghiên cứu này còn được thực hiện khi robot hoạt động dưới tác động của nhiễu. Kết quả mô phỏng

Tác giả liên hệ: ThS. Huỳnh Minh Vũ

Email: hmvu@ctu.edu.vn

kiểm nghiệm kết quả được thực hiện trên phần mềm MATLAB/Simulink.

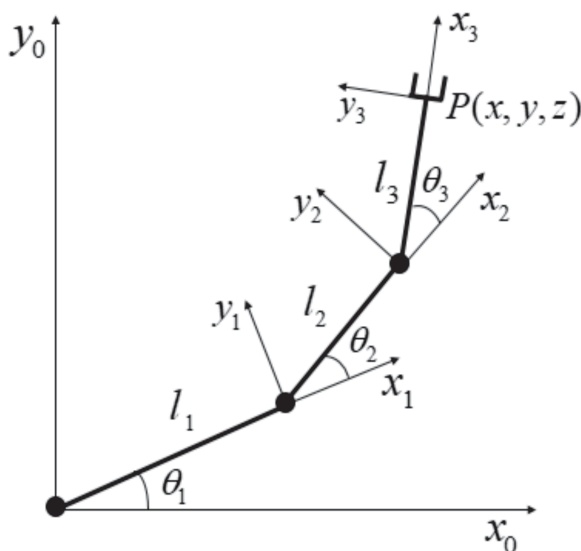
Nghiên cứu được tổ chức gồm bốn phần: Giới thiệu là phần 1; Mô hình toán đối tượng điều khiển được trình bày ở phần 2; Phần 3 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho robot và kết luận là nội dung của phần 4.

2. MÔ HÌNH TOÁN ĐỐI TƯỢNG ĐIỀU KHIỂN

2.1. Động học robot

2.1.1. Động học thuận

Khảo sát mô hình máy ba bậc tự do, được trình bày như Hình 1.



Hình 1. Đặt hệ tọa độ DH cho robot ba bậc tự do

Bài toán động học thuận phân tích chuyển động của robot dựa trên giá trị của các biến khớp và thông số vật lý của robot, để thực hiện bài toán trên cần đặt hệ tọa độ theo quy tắc DH (xem Hình 1) và thiết lập bảng thông số DH (xem Bảng 1). Khi đó các ma trận chuyển đổi được xác định:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Từ các ma trận (1), (2) và (3) suy ra ma trận chuyển đổi tổng quát (4).

$$H_3^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & P_x \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó:

$$P_x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$P_y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (5)$$

$$P_z = 0$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

Bảng 1. Bảng thông số DH

Khâu	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1^*
2	l_2	0	0	θ_2^*
3	l_3	0	0	θ_3^*

2.1.2. Động học nghịch

Ngược lại với bài toán động học thuận, bài toán động học nghịch robot xác định giá trị các biến khớp khi biết được vị trí của khâu chấp hành đầu cuối và các thông số vật lý của robot.

Dựa trên Hình 1 dễ dàng xác định được phương trình (6) và (7).

$$x_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

$$y_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (7)$$

$$x_2^2 + y_2^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 \quad (8)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x_2^2 + y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (9)$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x_2^2 + y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)^2} \quad (10)$$

Từ các phương trình (9) và (10) suy ra kết quả (11)

$$\theta_2 = a \tan 2(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (11)$$

Thay $\sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2$ và $\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2$ vào các phương trình (6) và (7) có được kết quả (12) và (13).

$$x_2 = \cos \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) - \sin \theta_1 (l_2 \sin \theta_2) \quad (12)$$

$$y_2 = \cos \theta_1 (l_2 \sin \theta_2) + \sin \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) \quad (13)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{(l_1 + l_2 \cos \theta_2) \cdot x_2 + l_2 \sin \theta_2 \cdot y_2}{x_2^2 + y_2^2} \quad (14)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{(l_1 + l_2 \cos \theta_2) \cdot y_2 - l_2 \sin \theta_2 \cdot x_2}{x_2^2 + y_2^2} \quad (15)$$

Từ các kết quả (14) và (15) suy ra kết quả (16).

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} \rightarrow \theta_1 = a \tan 2(\sin \theta_1, \cos \theta_1) \quad (16)$$

Dựa trên phương trình (5), (11) và (16) suy ra giá trị θ_3 như (17).

$$\theta_3 = \theta - \theta_1 - \theta_2 \quad (17)$$

2.2. Động lực học robot

Động lực học của robot ba bậc tự do có đặc trưng là tính phi tuyến cao và có dạng tổng quát được thể hiện như phương trình (18) [5 - 7].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = u \quad (18)$$

Với các ma trận thành phần [8-9]:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad \text{là ma trận quán tính (ma trận vuông);}$$

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{là ma trận hướng tâm và lực Coriolis;}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad \text{là ma trận trọng lực;}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \text{là ma trận mômen tác động lên các khớp.}$$

Trong đó:

$$M_{11} = m_1 l_1^2 + m_2 [l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2)] + m_3 [l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2) + 2l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{12} = M_{21} = m_2 [l_2^2 + l_1 l_2 \cos(\theta_2)] + m_3 [l_2^2 + l_3^2 + l_1 l_2 \cos(\theta_2) + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{13} = M_{31} = m_3 [l_3^2 + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{22} = m_2 l_2^2 + m_3 [l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{23} = M_{32} = m_3 [l_3^2 + l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{33} = m_3 l_3^2$$

$$V_1 = -(m_2 + m_3) l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin(\theta_2) - m_3 l_1 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_3)$$

$$V_2 = (m_2 + m_3) \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2) + m_3 l_1 l_3 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_3)$$

$$V_3 = m_3 l_1 l_3 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + m_2 l_2 l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin(\theta_3)$$

$$G_1 = m_1 g l_1 \cos(\theta_1) + m_2 g [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1)] + m_3 g [l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)]$$

$$G_2 = m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 g [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)]$$

$$G_3 = m_3 g l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

Bảng 2. Thông số mô phỏng cho mô hình

Kí hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
l_1	Khối lượng của khớp 1	1 kg
l_2	Khối lượng của khớp 2	0.8 kg
l_3	Khối lượng của khớp 3	0.5 kg
m_1	Chiều dài của khớp 1	1 m
m_2	Chiều dài của khớp 2	0.8 m
m_3	Chiều dài của khớp 3	0.6 m
g	Gia tốc trọng trường	9.81 m/s ²

Dựa trên phương trình động lực học (18) tiến hành mô hình hóa và điều khiển robot ba bậc tự do trên MATLAB/Simulink để kiểm tra kết quả của bộ điều khiển được đề xuất.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho robot

Từ phương trình (18) suy ra (19).

$$\ddot{\theta} = M^{-1} (u - V - G) \quad (19)$$

Đặt các giá trị:

$$\begin{cases} x_1 = \theta = y \\ x_2 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (20)$$

$$\rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} \end{cases} \quad (21)$$

với x_1, x_2 là ma trận các biến trạng thái và y là ma trận ngõ ra.

Gọi e là ma trận tín hiệu lỗi và y_d là ma trận tín hiệu đặt của mô hình điều khiển, có được phương trình (22).

$$e = y_d - y = \theta_d - \theta \quad (22)$$

Từ phương trình (22) suy ra (23) và (24).

$$\dot{e} = \dot{y}_d - \dot{y} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (23)$$

$$e = y_d - y = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \quad (24)$$

Thay phương trình (19) vào (24), có được (25).

$$\ddot{e} = \ddot{y}_d - f(x) - g(x)u \quad (25)$$

Trong đó: $f(x) = M^{-1}(-V-G)$, $g(x) = M^{-1}$

Biểu thức bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa có dạng như (26) [10], với u là tín hiệu điều khiển và v là biểu thức của bộ điều khiển bám được định nghĩa như (27), trong đó k_v và k_p là những hằng số được chọn dựa trên phương trình đặc trưng của hệ thống.

$$u = g(x)^{-1} (-f(x) + v) \quad (26)$$

$$v = y_d + (k_v \dot{e} + k_p e) \quad (27)$$

3.2. Kết quả mô phỏng

Nhằm chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất tác giả tiến hành mô phỏng với khâu chấp hành đầu cuối có quỹ đạo hình tròn (được trình bày như hệ phương trình (28) và hình Butterfly (được trình bày như hệ phương trình (29)), bên cạnh đó bộ điều khiển còn được kiểm chứng dưới tác động của nhiễu.

$$\begin{aligned} x &= 1 + 0.5 \sin\left(\frac{2\pi}{5}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ y &= 1 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi}{5}t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (28)$$

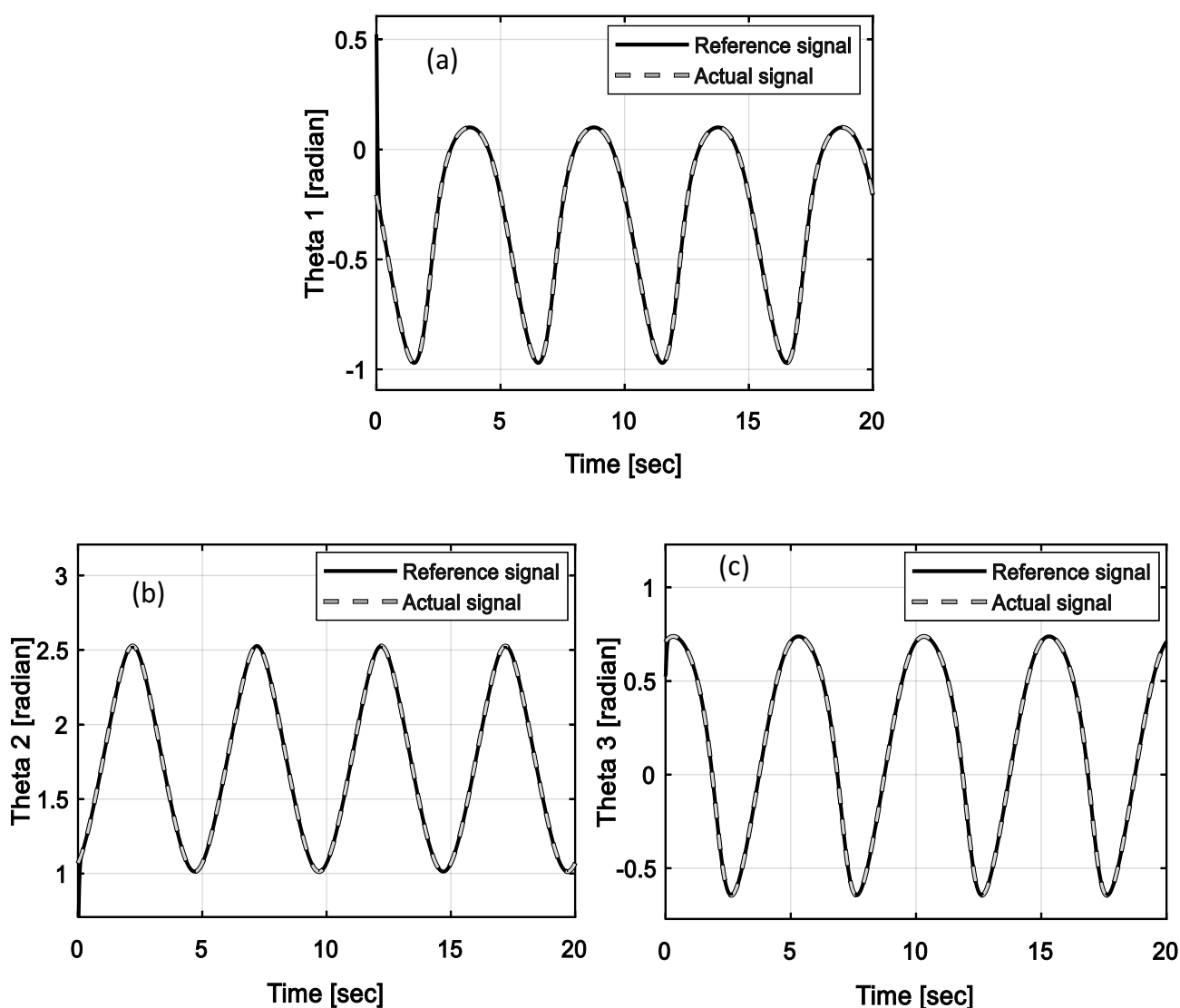
$$z = 0$$

$$\begin{aligned} x &= 1 + 0.15 \sin(t) \left(e^{\cos(t)} - 2 \cos(4t) + \sin^5\left(\frac{t}{12}\right) \right) \\ y &= 1 + 0.15 \cos(t) \left(e^{\cos(t)} - 2 \cos(4t) + \sin^5\left(\frac{t}{12}\right) \right) \end{aligned} \quad (29)$$

$$z = 0$$

Tiến hành kiểm chứng đáp ứng của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả khai báo các thông

số mô hình điều khiển như Bảng 2 và chọn các giá trị là $k_v = 35$ và $k_p = 625$.



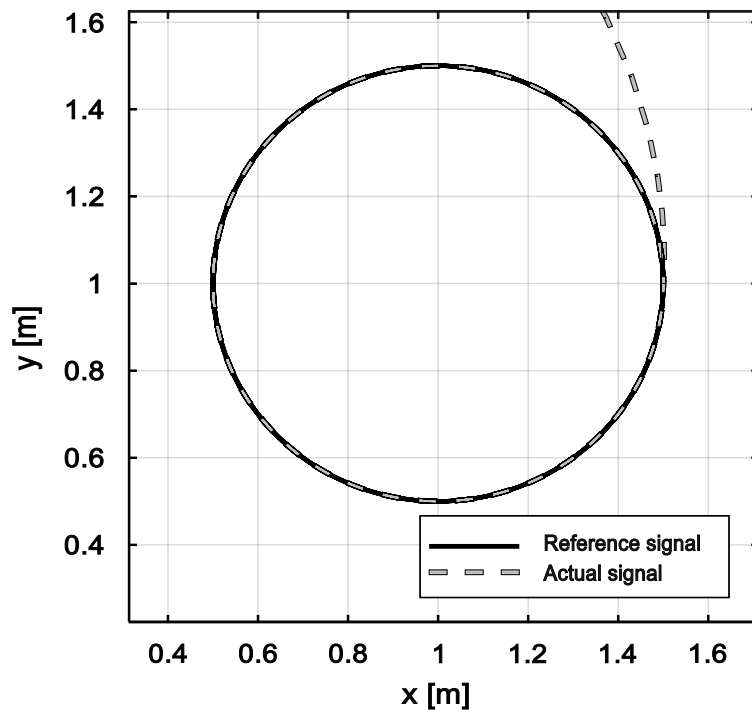
Hình 2. Đáp ứng ngõ ra vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình tròn

Đáp ứng vị trí của các khớp khi quỹ đạo tham chiếu là hình tròn được trình bày như Hình 2. Từ kết quả trên, dễ dàng thấy rằng giai đoạn đầu đáp ứng vị trí của các khớp cần một khoảng thời gian ngắn để di chuyển từ vị trí ban đầu đến vị trí tham chiếu, tuy nhiên có thể triệt tiêu khoảng thời gian trên bằng cách cài đặt lại vị trí ban đầu của các biến khớp. Việc này có thể thực hiện dễ dàng trong quá trình mô hình hóa robot trên phần mềm MATLAB/Simulink bằng cách định nghĩa thông số ban đầu của khối tích phân

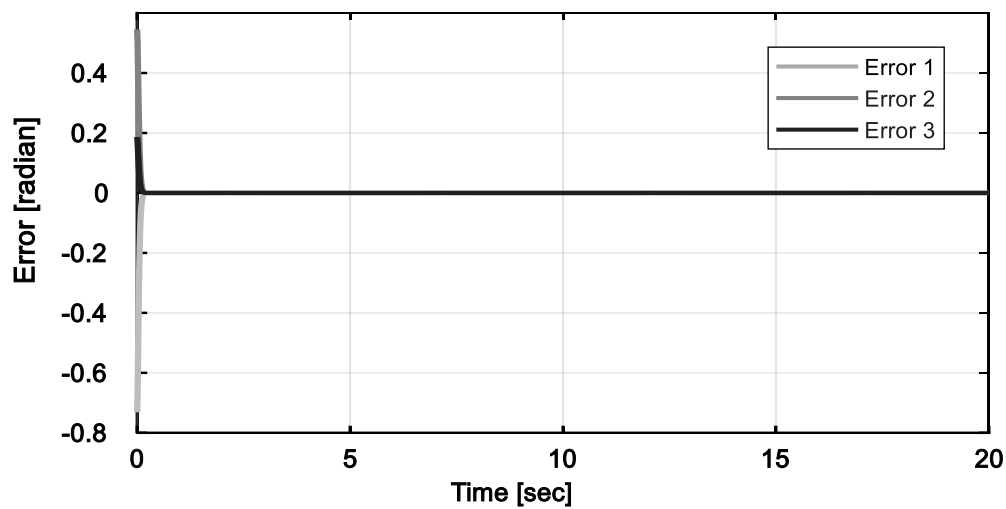
(giá trị mặc định ban đầu là 0).

Đáp ứng của khâu chấp hành đầu cuối và sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo là hình tròn được trình bày như Hình 3, Hình 4 và Hình 5.

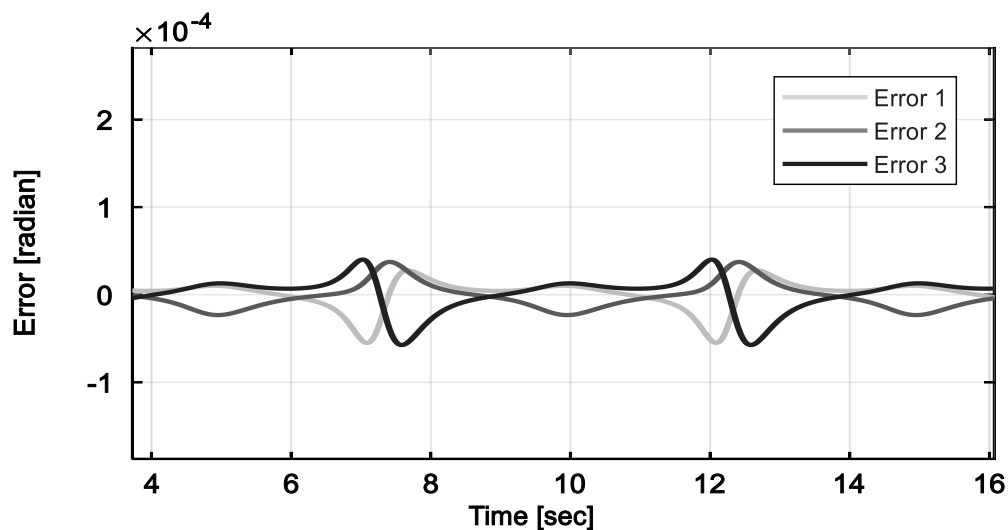
Kết quả Hình 3 cho thấy giai đoạn đầu khâu chấp hành đầu cuối chưa bám được quỹ đạo tham chiếu. Tuy nhiên, sai số bám vị trí giữa khâu đầu cuối và tín hiệu tham chiếu giảm dần theo thời gian và quỹ đạo khâu chấp hành đầu cuối hội tụ về chất lượng bám cận tối ưu.



Hình 3. Đáp ứng quỹ đạo hình tròn của khâu chấp hành đầu cuối



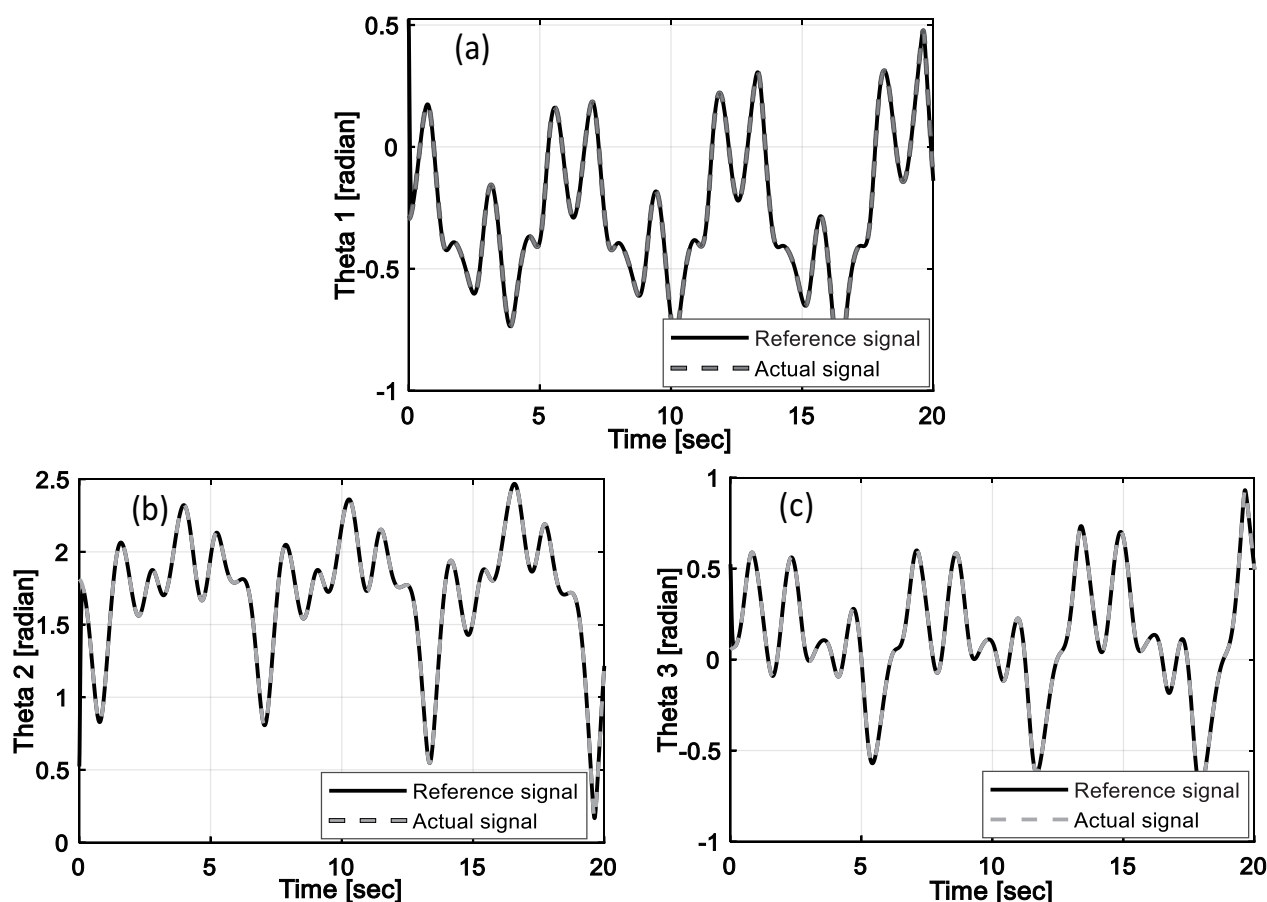
Hình 4. Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình tròn



Hình 5. Sai số vị trí của các khớp được phóng to khi quỹ đạo hình tròn

Kết quả Hình 4 và Hình 5 cho thấy sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo tham chiếu là hình tròn có

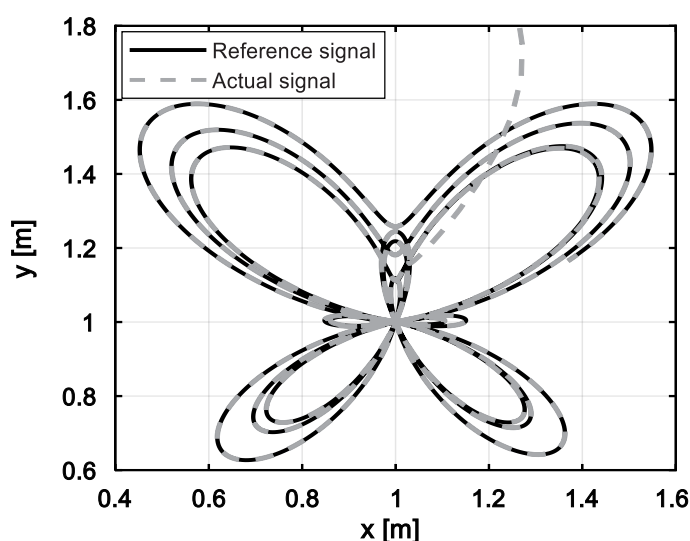
giá trị không đáng kể khi có sự thay đổi lớn về giá trị của các biến khớp và sau đó gần như hội tụ về 0.



Hình 6. Đáp ứng ngõ ra vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình Butterfly

Tương tự, đối với quỹ đạo tham chiếu là hình Butterfly đáp ứng ngõ ra vị trí của các khớp được trình bày như Hình 6 cũng như quỹ đạo khâu chấp hành đầu cuối thể hiện như Hình 7. Kết quả cho thấy giai đoạn đầu khâu chấp hành đầu cuối

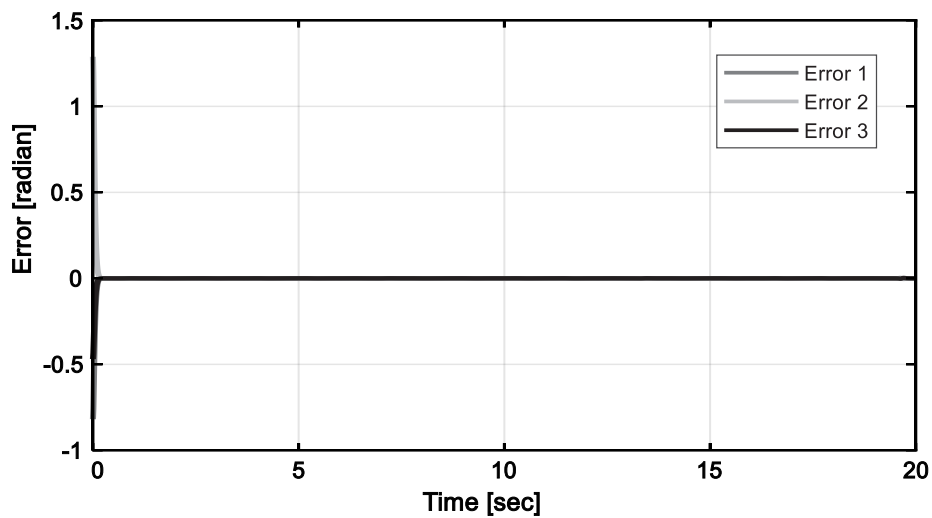
của robot chưa bám được quỹ đạo tham chiếu hình Butterfly. Tuy nhiên, sai số bám vị trí giữa khâu đầu cuối và tín hiệu tham chiếu giảm dần theo thời gian và quỹ đạo khâu chấp hành đầu cuối hội tụ về chất lượng bám cận tối ưu.



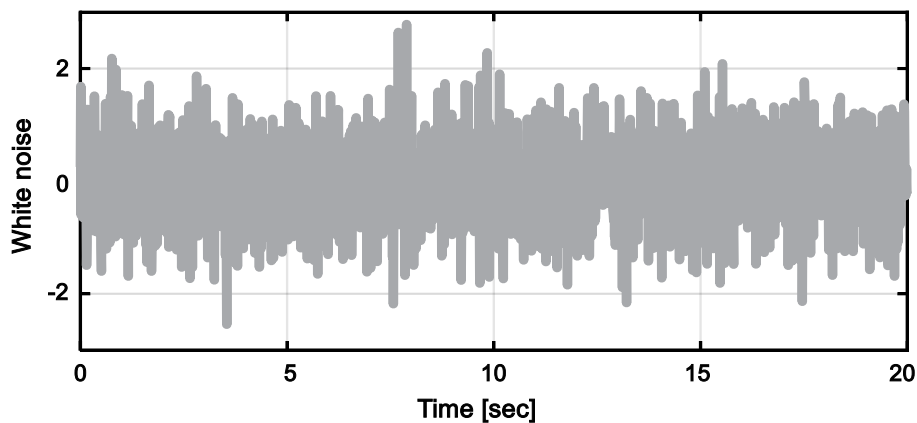
Hình 7. Đáp ứng quỹ đạo hình Butterfly của khâu chấp hành đầu cuối

Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo là hình Butterfly được trình bày như Hình 8 và Hình 10. Kết quả cho thấy sai số có sự biến động hơn so

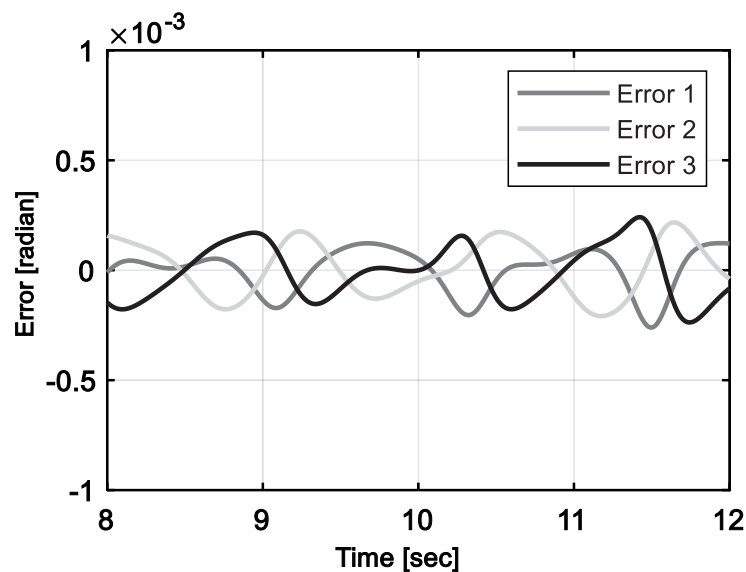
với tín hiệu tham chiếu là hình tròn, tuy nhiên biến động đó không đáng kể và sau đó sai số cũng dần hội tụ về 0.



Hình 8 . Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình Butterfly



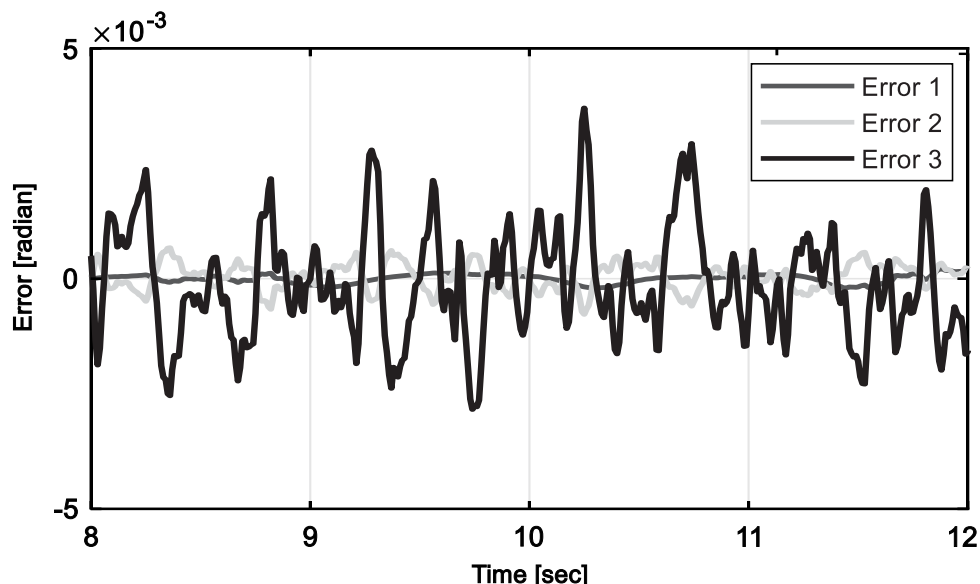
Hình 9. Tín hiệu nhiễu trắng



Hình 10 . Sai số vị trí của các khớp được phóng to khi quỹ đạo hình Butterfly

Để kiểm tra sự ổn định và bền vững của bộ điều khiển dưới tác động của nhiễu, tác giả đã giả sử dụng hệ thống chịu tác động bởi nhiễu trắng có biên độ dao động được trình bày như Hình 9 và sai số vị trí của các khớp có

dao động như Hình 11. Kết quả cũng cho thấy vị trí khâu chấp hành đầu cuối vẫn bám tốt so với tín hiệu tham chiếu (tương tự như Hình 7) và hội tụ về chất lượng bám cận tối ưu theo thời gian.



Hình 11. Sai số vị trí của các khớp khi có nhiễu tác động

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất một giải pháp để điều khiển mô hình động lực học robot dựa trên phương trình toán học cụ thể là mô hình robot có ba bậc tự do, sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa.

Các kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm MATLAB/Simulink cho thấy đáp ứng thực tế bám tín hiệu đặt rất tốt với tín hiệu đặt, có các

thông số chất lượng hệ thống như: thời gian xác lập là 0.25(s), không dao động và sai số xác lập bị triệt tiêu. Song, hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất còn được kiểm chứng khi điều khiển vị trí các khớp của mô hình robot ba bậc tự do bám theo tín hiệu đặt trước dưới sự tác động của nhiễu.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là áp dụng bộ điều khiển thông minh vào mô hình robot ba bậc tự do.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H.M. Vũ, T.T. Hùng và N.C. Ngôn, “Điều khiển robot SCARA sử dụng giải thuật mờ-nơon,” *Tạp chí Khoa học Giáo Dục Kỹ thuật*, số 54 (09/2019): 80-86, 2019.
- [2] F. Valero, V. Mata and A. Besa, “Trajectory Planning In Workspaces With Obstacles Taking Into Account The Dynamic Robot Behaviour,” *Mechanism And Machine Theory*, vol. 41, pp. 525-536, 2006.
- [3] N.H. Dũng, “Điều khiển trượt thích nghi

dùng mô hình nơon mờ,” *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 15a: 273-282, 2010.

- [4] 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,” *Applied Soft Computing* 11, 4943-4953, 2011.

[5] F.L. Lewis, *Robot manipulator control theory and practice*, Place of publication: Springer, 2004.

- [6] J. Kim,..., M. Al-Shabi, "Dynamic Modeling and Motion Control of a Three-Link Robotic Manipulator," *The 2017 International Conference on Artificial Life and Robotics, Japan, 2017*. Place of Publication: Seagaia Convention Center, 2017, 19-22.
- [7] S.G. Ahmad, M.A. El-Gohary, M.S. Elksas and F.G. Areed, "Three Link Rigid Manipulator Control Using Improved Neural Network Based PID Controller." *International Journal of Neural Networks and Advanced Applications*, vol. 06, pp. 60-68, 2019.
- [8] A. Gokhan and G. Canserver, "Adaptive neural network based fuzzy sliding mode control of robot manipulator". *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Bangkok, 2006. Place of Publication: Bangkok, 2006, 1-6.
- [9] N. H. Dũng, "Điều khiển trượt hệ phi tuyến dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm," *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 15a: 263-272, 2010.
- [10] R. Bonna and J. F. Camino, "Trajectory Tracking Control of a Quadrotor Using Feedback Linearization," *Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics*, 22-27, 2015.

Study on modeling control of robot with three degrees of freedom using linear feedback

Huynh Minh Vu

ABSTRACT

This study presents the application of feedback linearization for 3-dof manipulator systems. Robot manipulator is a multi-input multi-output system with high complex nonlinear dynamics, requiring an advanced controller in order to track a specific trajectory. Forward and inverse kinematics are presented based on Denavit Hartenberg notation to convert the end effector planned path from cartesian space to joint space and vice versa. The simulation results show that proposed control is stable and robust in several conditions of noise affection and the position response of each joint has a settling time about 0.25(s), without fluctuation and steady-state error.

Keywords: robot manipulator, Denavit-Hartenberg (DH), nonlinear system control, systems modeling, feedback linearization

Received: 29/10/2021

Revised: 23/11/2021

Accepted for publication: 24/11/2021