

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BACKSTEPPING ÁP DỤNG CHO ROBOT HAI BẬC TỰ DO

Huỳnh Minh Vũ

Phó Hoàng Linh

Trường Đại học Kỹ thuật – Công nghệ Cần Thơ

*Tác giả liên hệ : Huỳnh Minh Vũ - Email: hmvu@ctu.edu.vn

(Ngày nhận bài: 21/2/2024, ngày nhận bài chỉnh sửa: 20/3/2024, ngày duyệt đăng: 27/3/2024)

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mục tiêu thiết kế bộ điều khiển trượt backstepping cho ứng dụng điều khiển robot hai bậc tự do dựa trên phương trình động lực học. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế với mục đích điều khiển tín hiệu các góc khớp của robot bám theo tín hiệu đặt trước, cũng như quỹ đạo khâu cuối bám theo quỹ đạo mong muốn và có thể cải thiện hiện tượng dao động quanh mặt trượt, mà là nhược điểm của bộ điều khiển trượt truyền thống. Kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm MATLAB/Simulink cho thấy đáp ứng vị trí các khớp của robot có thời gian xác lập là 0.2(s), không có dao động, sai số xác lập bị triệt tiêu, hiện tượng dao động quanh mặt trượt được cải thiện đáng kể. Ngoài ra, bộ điều khiển còn đáp ứng được khi có nhiễu tác động vào hệ thống.

Từ khóa: Động lực học robot, Denavit-Hartenberg (DH), điều khiển cuộn chiếu, điều khiển trượt, MATLAB/Simulink

1. Giới thiệu

Robot công nghiệp được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật và công nghệ, tuy nhiên robot công nghiệp là những hệ thống phức tạp, được ghép nối linh hoạt, phụ thuộc nhiều vào thời gian và phi tuyến tính cao. Những robot này được sử dụng phổ biến trong các công việc như hàn, phun sơn, hệ thống định vị chính xác, v.v. (HÜSEYİNOĞLU & Tayfun, 2018). Robot với hai bậc tự do là một ví dụ điển hình về hệ phi tuyến nhiều ngõ vào, nhiều ngõ ra. Nó đại diện để thử nghiệm và đánh giá hiệu suất của các khái niệm điều khiển khác nhau và đã được một số nhà nghiên cứu sử dụng để nghiên cứu và so sánh các phương án điều khiển khác nhau (Mohammed & Eltayeb, 2018). Bộ điều khiển robot đã được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp. Để cải thiện hiệu suất điều khiển cần phải lựa chọn một

phương pháp điều khiển phù hợp. Nhiều phương pháp điều khiển đã được triển khai cho các hệ thống này để đạt được một hệ thống điều khiển chính xác, bền vững và hiệu quả (Rahmani et al., 2020). Nghiên cứu (Vu, 2021) đã ứng dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa để điều khiển mô hình robot ba bậc tự do. Bài báo (Zakia et al., 2019) đã điều khiển mô hình robot hai bậc tự do dựa trên thuật toán PID-SMC. Trong (Rojas et al., 2016) đã ứng dụng bộ điều khiển LQR để kiểm soát các khớp của robot hai bậc tự do. Bộ điều khiển mờ đã được xây dựng để điều khiển robot hai bậc tự do trong (Dersarkissian et al., 2018). Trình bày (Thang, 2019) đã áp dụng bộ điều khiển trượt truyền thống để điều khiển robot hai bậc được mô hình hóa dựa trên Simmechanics.

Bộ điều khiển trượt (SMC – Sliding Mode Control) được biết đến là công cụ

mạnh mẽ để điều khiển các đối tượng phi tuyến (Thien et al., 2021), ngoài ra còn là một trong các phương pháp điều khiển hiệu quả hệ thống với ưu điểm là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống nhiễu hay đối tượng có thông số của mô hình thay đổi theo thời gian (Leśniewski & Bartoszewicz, 2021). Tuy nhiên, nhược điểm chính của bộ điều khiển trượt là hiện tượng dao động tần số cao (còn gọi là hiện tượng chattering) quanh mặt trượt. Hiện tượng chattering do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng (Zarma et al.,

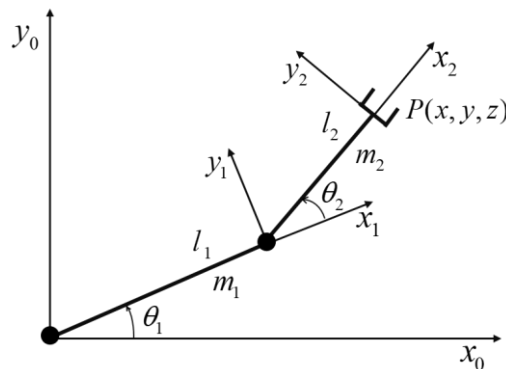
2018; Tung et al., 2022). Phương pháp backstepping dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và thường được sử dụng như một phần của thiết kế điều khiển (Khan et al., 2021). Ý tưởng chính của phương pháp backstepping là biến đổi hệ thống bậc cao thành các hệ thống bậc thấp dựa trên phương pháp đặt biến trạng thái. Phương pháp này đã được áp dụng rộng trong các kỹ thuật điều khiển, điển hình như trong kỹ thuật hàng không, kỹ thuật cơ khí, v.v. (Zhang et al., 2020).

2. Mô hình toán đối tượng điều khiển

2.1. Động học robot

Động học thuận

Khảo sát mô hình robot hai bậc tự do như Hình 1.



Hình 1: Mô hình robot hai bậc tự do

Mô hình robot hai bậc tự do có hai khâu với khối lượng lần lượt là m_1, m_2 ; chiều dài các khâu tương ứng là l_1, l_2 ; các biến khớp θ_1, θ_2 có chiều dương được quy định như Hình 1 và điểm cuối (điểm thao tác) của robot là $P(x, y, z)$.

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^*

Để thực hiện bài toán động học thuận cần đặt hệ tọa độ theo quy tắc DH (được trình bày như Hình 1) và thiết lập bảng thông số DH (được trình bày như bảng 1). Khi đó các ma trận chuyển đổi được xác định:

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

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

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

$$H_2^0 = H_1^0 H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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 cuối và các thông số vật lý của robot.

Dựa vào kết quả (3), dễ dàng xác định các biến khớp như (4) và (5).

$$\theta_1 = a \tan 2 \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x l_1 + l_2 \cos \theta_2 + y l_2 \sin \theta_2}{x^2 + y^2} \right)^2}, \frac{x l_1 + l_2 \cos \theta_2 + y l_2 \sin \theta_2}{x^2 + y^2} \right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = a \tan 2 \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \right)^2}, \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \right) \quad (5)$$

2.2. Động lực học robot

Động lực học của robot hai bậc tự do có đặc trưng là tính phi tuyến cao và có dạng tổng quát được thể hiện như phương trình (6) (Thang, 2019).

$$\mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

với các thành phần:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \text{ là ma trận quán tính}$$

(ma trận vuông);

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{ là vector hướng tâm và lực}$$

Coriolis;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \text{ là vector trọng lực;}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \text{ là vector moment tác động lên}$$

các khớp.

trong đó:

$$M_{11} = (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2 m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{12} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{21} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{22} = m_2 l_2^2$$

$$V_1 = -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - 2 m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2$$

$$V_2 = m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2$$

$$G_1 = (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

Dựa trên phương trình động lực học (6) tiến hành mô hình hóa và điều khiển robot hai bậc tự do trên MATLAB/Simulink để kiểm tra kết quả

của bộ điều khiển được đề xuất, với các thông số mô phỏng được trình bày như Bảng 2.

Bảng 2: Thông số mô phỏng cho mô hình

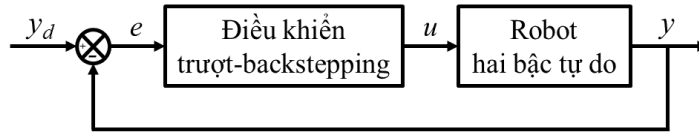
Kí hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
m_1	Khối lượng của khớp 1	1 kg
m_2	Khối lượng của khớp 2	0.8 kg
l_1	Chiều dài của khớp 1	1 m
l_2	Chiều dài của khớp 2	1 m
g	Gia tốc trọng trường	9.81 m/s ²

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1. Điều khiển trượt backstepping

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt backstepping cho robot hai bậc tự do được trình bày như hình 2. Trong đó,

nhiệm vụ chính của bộ điều khiển được đề xuất là cung cấp tín hiệu điều khiển u được tính toán dựa trên sai số e , sai số này được tính dựa trên hiệu số của tín hiệu đặt y_d và tín hiệu ra y .



Hình 2: Cấu trúc bộ điều khiển trượt-backstepping

Từ phương trình (6) suy ra (7).

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1} \tau - M(\theta)^{-1} V(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta)^{-1} G(\theta) \quad (7)$$

Đặt biến trạng thái:

$$\begin{cases} x_1 = \theta = y \\ x_2 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = M(\theta)^{-1} \tau - M(\theta)^{-1} V(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta)^{-1} G(\theta) \end{cases} \quad (9)$$

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

Đặt

$$f(x) = -M(\theta)^{-1} V(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta)^{-1} G(\theta)$$

và $g(x) = M(\theta)^{-1}$, khi đó (9) tương đương (10).

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = f(x) + g(x)\tau \end{cases} \quad (10)$$

Đặt $e_1 = x_1 - y_d$, với y_d là tín hiệu đặt, khi đó ta có (11).

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d = \dot{x}_2 - \dot{y}_d \quad (11)$$

Chọn hàm Lyapunov thứ nhất như công thức (12).

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (12)$$

$$\Leftrightarrow \dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{x}_2 - \dot{y}_d) \quad (13)$$

Để thỏa điều kiện $\dot{V}_1 \leq 0$, chọn mặt trượt như (14) theo (Liu & Wang, 2011).

$$s = x_2 + c_1 e_1 - \dot{y}_d = c_1 e_1 + \dot{e}_1, c_1 > 0 \quad (14)$$

Chọn hàm Lyapunov thứ hai như công thức (15).

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s_1^2 \quad (15)$$

Để thỏa điều kiện $\dot{V}_2 \leq 0$, chọn luật điều khiển như công thức (16).

$$u = \frac{1}{g(x)} (-f(x) - c_2 s - e_1 - c_1 \dot{e}_1 + \ddot{y}_d - \eta \text{sign}(s)) \quad (16)$$

trong đó: c_1, c_2 là hệ số của mặt trượt, $\eta > 0$ là hệ số của bộ điều khiển.

3.2. Kết quả mô phỏng

Để chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả đã mô phỏng với khâu chấp hành cuối có quỹ

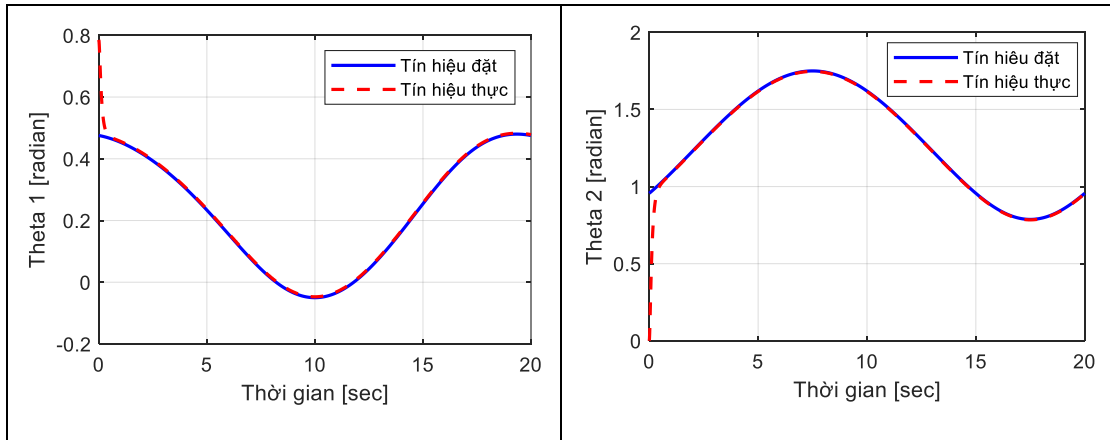
đạo hình tròn (công thức (17)) và hình Lissajous (công thức (18)), bên cạnh đó bộ điều khiển còn được kiểm chứng dưới tác động của nhiễu. Tiến hành kiểm chứng đáp ứng của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả khai báo các thông số mô hình điều khiển như Bảng 2 và chọn các hằng số trong luật điều khiển với $c_1 = 10$, $c_2 = 35$ và $\eta = 1$.

$$\begin{aligned} x &= 1 + 0.25 \sin\left(\frac{\pi}{10}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ y &= 1 + 0.25 \cos\left(\frac{\pi}{10}t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

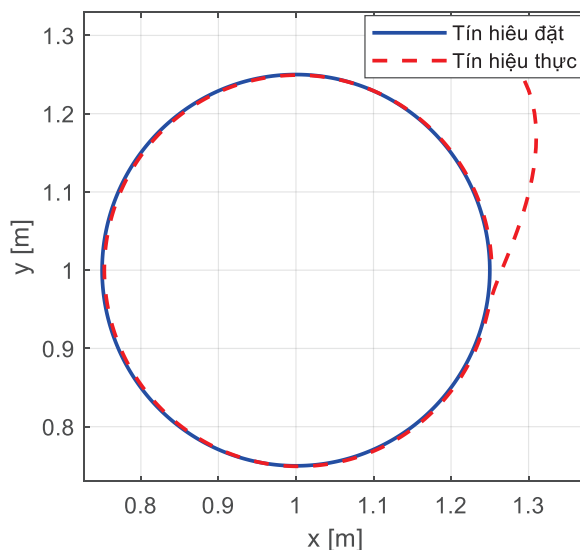
$$z = 0$$

$$\begin{aligned} x &= 1 + 0.25 \cos\left(0.5 * t + \frac{\pi}{2}\right) \\ y &= 1 + 0.25 \sin\left(0.5 * 3t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$z = 0$$



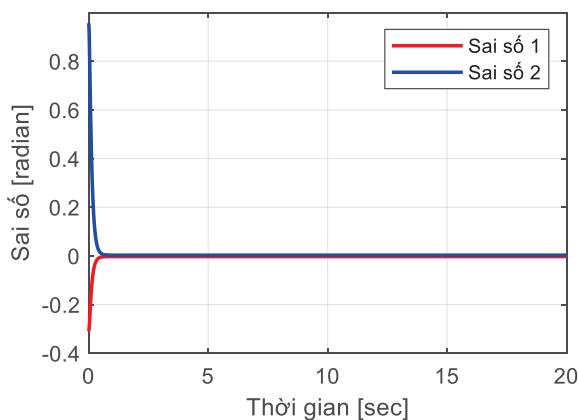
Hình 3: Đáp ứng ngõ ra vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình tròn



Hình 4: Đáp ứng quỹ đạo hình tròn của khâu chấp hành cuối

Hình 4 trình bày kết quả điều khiển của bộ điều khiển trượt backstepping khi robot di chuyển theo quỹ đạo hình tròn. Kết quả cho thấy đáp ứng của các góc khớp không xuất hiện độ vọt lố, không có dao động và sai số xác lập tiến về 0, quỹ

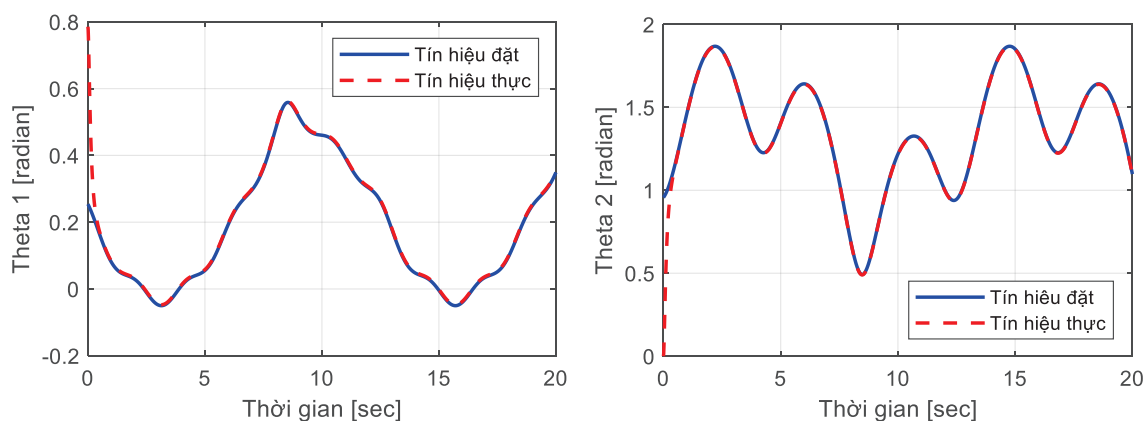
đạo của khâu cuối bám tốt so với quỹ đạo đặt hình tròn có bán kính 0,25m. Ngoài ra, sai số của các góc khớp thực tế so với tín hiệu đặt hội tụ về 0, điều đó được thể hiện qua hình 5.



Hình 5: Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình tròn

Để kiểm chứng thêm hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất, nhóm tác giả tiến hành mô phỏng điều khiển khi khâu cuối có quỹ đạo hình Lissajous. Kết quả điều khiển được trình bày như hình 6 và

hình 7 cho thấy đáp ứng đảm bảo các tiêu chí chất lượng hệ thống như độ vọt lố, thời gian tăng, thời gian xác lập và sai số xác lập. Quỹ đạo khâu chấp hành cuối hội tụ về chất lượng bám cận tối ưu.

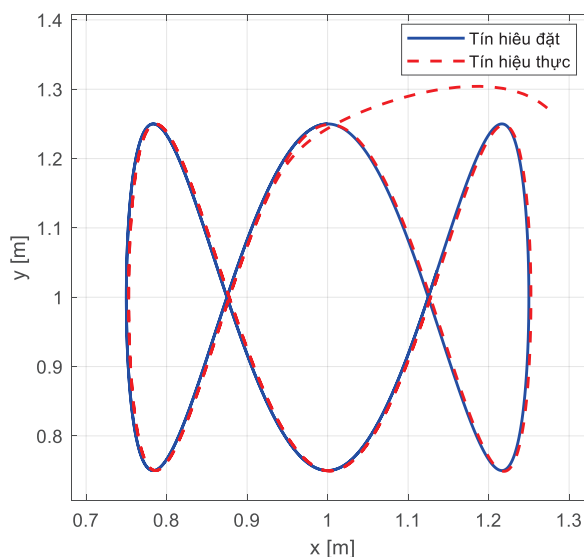


Hình 6: Đáp ứng ngõ ra vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình Lissajous

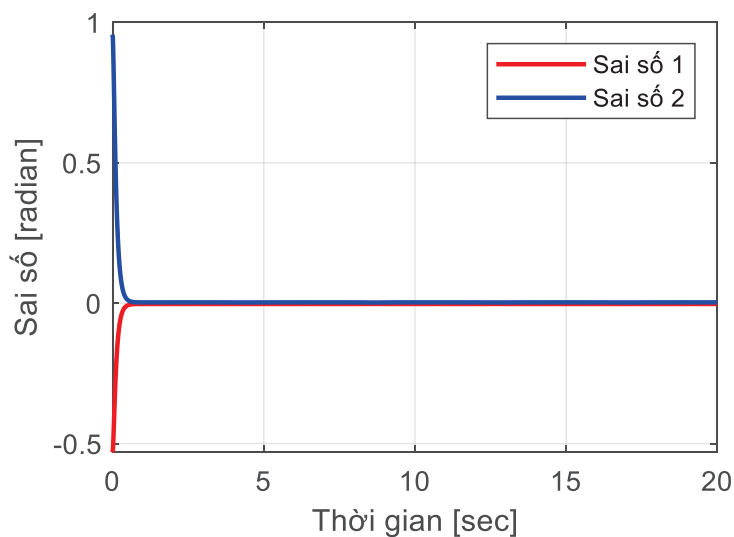
Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo là hình Lissajous được trình bày như hình 8. Kết quả cho thấy sai số có sự biến động hơn so với tín hiệu tham chiếu là hình tròn, tuy nhiên biến động đó không đáng kể và sau đó sai số cũng dần hội tụ về 0.

Hiện tượng chattering của tín hiệu

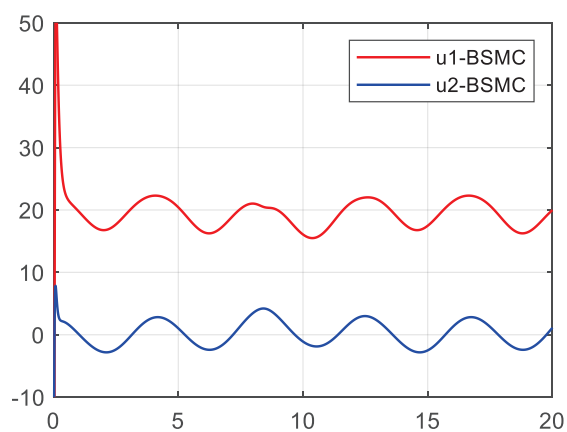
điều khiển trong hình 9 được khắc phục so với trường hợp sử dụng bộ điều khiển trượt truyền thống, với tín hiệu điều khiển được thể hiện qua hình 10. Như vậy, bộ điều khiển trượt backstepping đã khắc phục được hiện tượng dao động với tần số cao quanh mặt trượt.



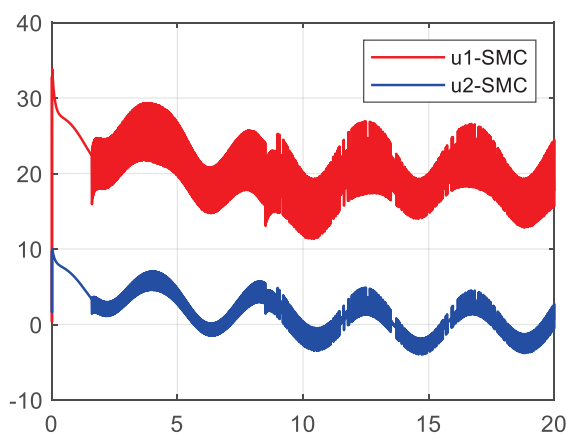
Hình 7: Đáp ứng quỹ đạo hình Lissajous của khâu chấp hành cuối



Hình 8: Sai số vị trí của các khớp khi quỹ đạo hình Lissajous



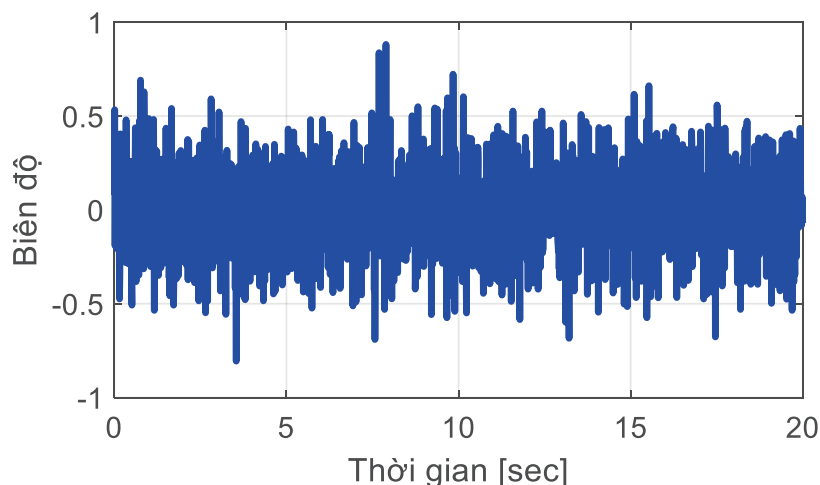
Hình 9: Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt backstepping



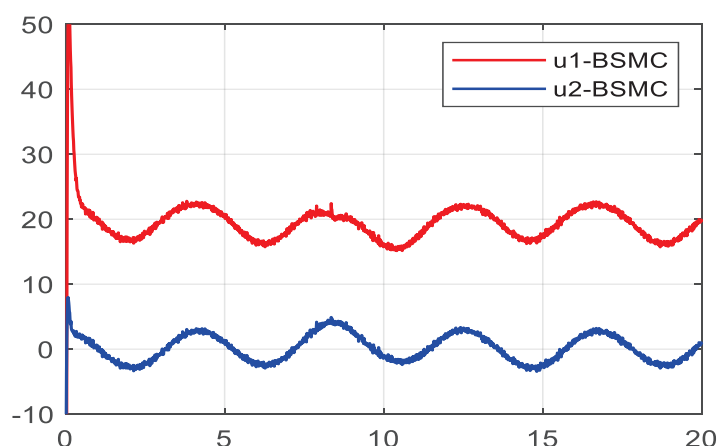
Hình 10: Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt truyền thống

Nhằm kiểm tra sự ổn định và bền vững của bộ điều khiển dưới tác động của nhiễu, nhóm tác giả đã giả sử hệ thống chịu tác động bởi nhiễu trắng có biên độ dao động được trình bày như hình 11. Kết quả cũng cho thấy tín hiệu điều khiển có

dao động (hình 12), tuy nhiên vị trí khâu chấp hành 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: Tín hiệu nhiễu trắng



Hình 12: Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt backstepping khi có nhiễu tác động

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã đề xuất một giải pháp để điều khiển mô hình robot có hai bậc tự do dựa trên phương trình động lực học, sử dụng bộ điều khiển trượt backstepping. 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 0.2 giây, không dao động và sai số xác lập bị triệt tiêu. Quỹ đạo khâu cuối của robot bám tốt so với quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển được đề xuất đã khắc phục được

hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Ngoài ra, tính ổn định và bền vững của bộ điều khiển được đề xuất còn được kiểm chứng khi điều khiển vị trí các khớp của mô hình robot hai bậc tự do bám theo tín hiệu đặt trước dưới sự tác động của nhiễu.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là có thể triển khai bộ điều khiển được đề xuất trên mô hình robot hai bậc tự do thực tế và áp dụng các bộ điều khiển thông minh vào mô hình robot hai bậc tự do.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Dersarkissian, N., Jia, R., & Feitosa, D. L. (2018). Control of a two-link robotic arm using fuzzy logic. In *2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)* (pp. 481-486). IEEE.
- HÜSEYİNOĞLU, M., & Tayfun, A. B. U. T. (2018). Dynamic model and control of 2-dof robotic arm. *European Journal of Technique (EJT)*, 8(2), 141-150.
- Khan, Z. A., Khan, L., Ahmad, S., Mumtaz, S., Jafar, M., & Khan, Q. (2021). RBF neural network based backstepping terminal sliding mode MPPT control technique for PV system. *Plos one*, 16(4), e0249705.
- Leśniewski, P., & Bartoszewicz, A. (2021). Reaching Law Based Sliding Mode Control of Sampled Time Systems. *Energies*, 14(7), 1882.
- Liu, J., & Wang, X. (2011). *Advanced sliding mode control for mechanical systems* (pp. 91-92). Springer Berlin Heidelberg.
- Mohammed, A. A., & Eltayeb, A. (2018). Dynamics and control of a two-link manipulator using PID and sliding mode control. In *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)* (pp. 1-5). IEEE.
- Rahmani, M., Komijani, H., & Rahman, M. H. (2020). New sliding mode control of 2-DOF robot manipulator based on extended grey wolf optimizer. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 1572-1580.
- Rojas, J. H. C., Serrezuela, R. R., López, J. A. Q., & Perdomo, K. L. R. (2016). LQR hybrid approach control of a robotic arm two degrees of freedom. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(17), 9221-9228.
- Thang, N. T. (2019). Sliding mode control-based system for the two-link robot arm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 9(4), 2771-2778.
- Thien, T. D., Anh, T. H. V., & Ahn, K. K. (2021). Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control of robotic manipulator based neural network approach. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22, 417-429.
- Tung, P. T., Duc, L. T. Q., & Ngon, N. C. (2022). Ứng dụng điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ hệ thống bốn kép. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, 228, 78-85.
- Vũ, H. M. (2021). Nghiên cứu mô hình điều khiển robot ba bậc tự do bằng hồi tiếp tuyến tính hóa. *Tạp chí Khoa học - Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng*, 18, 105-114.
- Zakia, U., Moallem, M., & Menon, C. (2019). PID-SMC controller for a 2-DOF planar

- robot. In *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)* (pp. 1-5). IEEE.
- Zarma, T., Thomas, S., & Galadima, A. (2018). Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System. In *IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology* (pp. 1-9).
- Zhang, S., Yong, E. M., Zhou, Y., & Qian, W. Q. (2020). Dynamic backstepping control for pure-feedback non-linear systems. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 37(2), 674-697.

STUDY ON BACKSTEPPING SLIDING MODE CONTROL APPLICATION FOR TWO DEGREES OF FREEDOM ROBOT

Huynh Minh Vu

Pho Hoang Linh

Can Tho University of Technology

*Corresponding author: Huynh Minh Vu - Email: hmvu@ctu.edu.vn

(Received: 21/2/2024, Revised: 20/3/2024, Accepted for publication: 27/3/2024)

ABSTRACT

This study aims to design a backstepping sliding mode control for two degrees of freedom robot based on dynamic equations. The proposed controller is designed with the purpose of controlling the robot's joint angles according to the desired signal, as well as the final trajectory following the desired trajectory, and improving the oscillation phenomenon around the sliding surface, which is the drawback of traditional sliding controllers. Simulation results based on MATLAB/Simulink software show that the settling time of the robot's joint position response is 0.2(s), without any fluctuation or steady-state error, and the oscillation phenomenon around the sliding surface is significantly improved. Besides, the controller was also able to respond well to noise interference on the systems.

Keywords: Robot manipulator, Denavit-Hartenberg (DH), Backstepping control, Sliding mode control, Simulink/MATLAB