

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI MỜ ROBOT 3 BẬC TỰ DO RPP

ADAPTIVE FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR THREE DEGREES OF FREEDOM ROBOT RPP

Phí Hoàng Nhã^{1,*}, Nguyễn Đăng Hải¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.81>

TÓM TẮT

Robot 3 bậc tự do RPP được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như sơn, hàn,... Điều khiển robot bám quỹ đạo là một bài toán điều khiển quan trọng trong hệ thống robot công nghiệp hiện nay. Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển trượt thích nghi mờ có xét đến yếu tố nhiễu để điều khiển bám quỹ đạo cho robot 3 bậc tự do RPP. Các kết quả được kiểm chứng thông qua mô phỏng số với nhiều kịch bản khác nhau cho thấy bộ điều khiển trượt thích nghi mờ cho chất lượng điều khiển tốt với khả năng bám quỹ đạo chính xác.

Từ khóa: Robot, RPP, điều khiển trượt, điều khiển trượt thích nghi mờ.

ABSTRACT

An RPP-3 degree of freedom (RPP-3DOF) robot is widely applied in many industrial fields such as painting and welding, etc. Controlling industrial robots to follow the desired trajectory is a challenging task today. This paper presents an adaptive fuzzy sliding control method that considers disturbances in controlling the trajectory of RPP-3DOF robots. The simulation results show that the proposed controller provides good control quality with accurate trajectory tracking in many different scenarios.

Keywords: Robot, RPP, Sliding control, Adaptive fuzzy sliding control.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: phihoangnha@gmail.com; nhaph@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/02/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 29/6/2022

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2022

1. GIỚI THIỆU

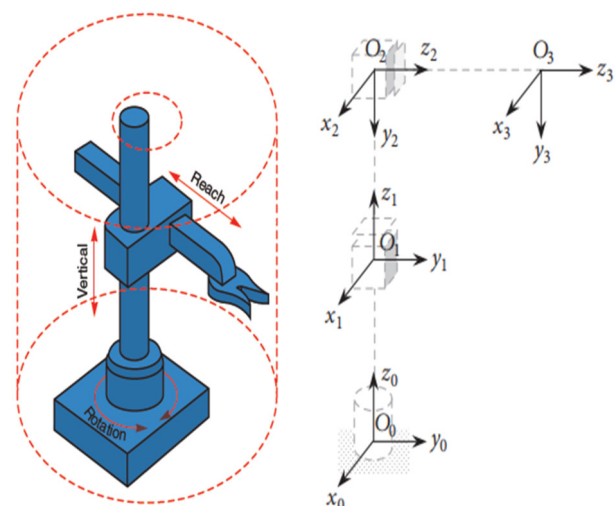
Robot là thiết bị hết sức quan trọng và không thể thiếu được trong đời sống xã hội, nhất là trong môi trường công nghiệp [1]. Robot công nghiệp hoạt động trong các lĩnh vực đặc thù, nguy hiểm như hàn, đúc, phun phủ, sơn,... Đây đều là những công việc đòi hỏi robot phải hoạt động ổn định với độ chính xác cao. Vì vậy, bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot 3 bậc tự do RPP dành được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Công trình [2] thực hiện bài toán điều khiển cho robot sử dụng thuật toán trượt thích nghi mờ, tuy nhiên thuật toán này dùng mạng mờ nên bài toán trở nên phức tạp, đối tượng là robot 3 bậc tự do không phải loại RPP. Nghiên cứu [3] tập trung vào việc thiết kế cánh tay robot, sử

dụng bộ điều khiển truyền thống để điều khiển hoạt động của robot. Công bố [4-7] là các nghiên cứu về robot 3 bậc tự do, nhưng không phải loại robot RPP. Như vậy, robot 3 bậc tự do RPP còn chưa được nhiều công trình quan tâm, hầu hết các công trình công bố trên hoặc chỉ dừng lại ở các thuật toán điều khiển cơ bản, chưa xét tới tác động của nhiễu hoặc đối tượng điều khiển là robot khác. Chính vì vậy, trong bài báo này, thuật toán điều khiển trượt được áp dụng để điều khiển cho robot 3 bậc tự do RPP bám quỹ đạo cho trước, kết hợp với bộ điều khiển mờ nhằm hạn chế ảnh hưởng của nhiễu đến hệ thống.

Sau phần giới thiệu, nội dung bài báo sẽ trình bày mô hình toán của robot 3 bậc tự do RPP; thuật toán điều khiển trượt thích nghi mờ; kết quả mô phỏng số; và cuối cùng là kết luận.

2. MÔ HÌNH TOÁN ROBOT 3 BẬC TỰ DO RPP

Mô tả toán học của robot được xây dựng theo phương trình mô tả vị trí và hướng của động học chất điểm trong không gian theo hệ quy chiếu xác định. Vì vậy, phần 2, bài báo trình bày mô tả toán học của robot 3 bậc tự do RPP theo [1].



Hình 1. Robot 3 bậc tự do RPP

Cấu tạo Robot 3 bậc tự do RPP gồm 3 khớp chuyển động $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ trong đó khớp đầu tiên là khớp

xoay và 2 khớp tiếp theo là khớp tịnh tiến. Với cấu tạo này, không gian làm việc của Robot RPP sẽ có dạng hình trụ.

Đối với Robot công nghiệp có 3 bậc tự do RPP để xây dựng mô hình toán học thể hiện mối quan hệ giữa các trạng thái của hệ thống với lực hoặc momen đặt lên các khớp ta sử dụng phương pháp Euler - Lagrange. Khi đó, phương trình động lực học của Robot Planar được biểu diễn dưới dạng:

$$M(\underline{q}, \underline{\dot{q}})\underline{\ddot{q}} + C(\underline{q}, \underline{\dot{q}})\underline{\dot{q}} + G(\underline{q}) = \underline{u} \quad (1)$$

Trong đó vecto $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vecto trạng thái của các biến khớp, $\underline{\dot{q}}$ và $\underline{\ddot{q}}$ lần lượt là đạo hàm cấp một và đạo hàm cấp hai của $\underline{q}$ theo thời gian, vecto

$\underline{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vecto các tín hiệu điều khiển. Ma trận $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính luôn đối xứng, xác định dương. Ma trận $C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ đại diện cho thành phần tương hỗ và thành phần ly tâm, vecto $G \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ đại diện cho thành phần trọng trường. Dựa trên phương pháp Euler-Lagrange và [1] ta thu được mô hình toán học của Robot 3 bậc tự do RPP như sau:

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

Biểu diễn lại dưới dạng ma trận ta có:

$$\bar{M}\underline{\ddot{q}} + \underline{f} = \underline{u} \quad (3)$$

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

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

Mô hình (3) sẽ là mô hình được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển ở phần tiếp theo của bài báo.

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI MỜ CHO ROBOT 3 BẬC TỰ DO RPP

3.1. Thuật toán điều khiển trượt cho robot 3 bậc tự do RPP

Điều khiển trượt (SMC) có một số ưu điểm nổi trội là bền vững, ít nhạy cảm với sự thay đổi các tham số của hệ và các nhiễu động. Vì vậy điều khiển trượt hay được áp dụng trong bài toán điều khiển phi tuyến các robot. Quá trình điều khiển trượt thường gồm hai bước: Bước một là đưa hệ thống vào quỹ đạo của mặt trượt, bước hai là duy trì hệ thống trên mặt trượt. Để sử dụng điều khiển trượt ta phải xác định mặt trượt. Ở đây mặt trượt được chọn dưới dạng PD như sau:

$$\underline{v} = \underline{\dot{e}} + L\underline{e} \quad (4)$$

Với $\underline{e} = \underline{q} - \underline{r}$ là sai lệch điều khiển trong đó $\underline{r}$ là tín hiệu đặt và L là ma trận đường chéo xác định dương. Khi đó đạo hàm của $\underline{v}$ theo thời gian bằng:

$$\underline{\dot{v}} = \underline{\ddot{e}} + L\underline{\dot{e}} = \bar{M}^{-1}(\underline{u} - \underline{f}) + L\underline{\dot{q}} - \underline{\ddot{r}} - L\underline{\dot{r}} \quad (5)$$

Chọn hàm Lyapunov đối xứng xác định dương dạng:

$$V(t) = \frac{1}{2} \underline{v}^T \underline{v} \quad (6)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov theo thời gian bằng:

$$\dot{V} = \underline{v}^T \underline{\dot{v}} = \underline{v}^T (\bar{M}^{-1}(\underline{u} - \underline{f}) + L\underline{\dot{q}} - \underline{\ddot{r}} - L\underline{\dot{r}}) \quad (7)$$

Luật điều khiển được thiết kế như sau:

$$\underline{u} = \underline{f} - \bar{M}(L\underline{\dot{q}} - \underline{\ddot{r}} - L\underline{\dot{r}} + K_1\underline{v} + K_2 \text{sgn}(\underline{v})) \quad (8)$$

Với K_1, K_2 là ma trận đường chéo xác định dương. Thay vào đạo hàm của hàm Lyapunov thu được:

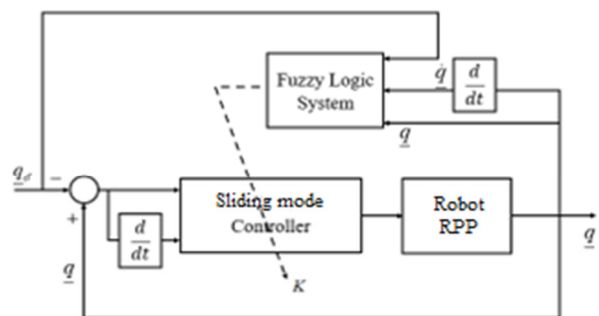
$$\dot{V} = \underline{v}^T \underline{\dot{v}} = \underline{v}^T (-K_1\underline{v} - K_2 \text{sgn}(\underline{v})) = -\underline{v}^T K_1 \underline{v} - \underline{v}^T K_2 \text{sgn}(\underline{v}) \quad (9)$$

Như vậy đạo hàm của V xác định âm do đó theo tiêu chuẩn Lyapunov hệ sẽ ổn định và sai lệch điều khiển hội tụ về không.

3.2. Thuật toán điều khiển trượt thích nghi mờ cho robot 3 bậc tự do RPP

Với bộ điều khiển được thiết kế theo phương pháp điều khiển trượt, các trạng thái của đối tượng sẽ bám được theo các quỹ đạo đặt mong muốn tuy nhiên trong vận hành thực tế hệ thống làm việc dưới các điều kiện khác nhau có thể sẽ chịu thêm sự ảnh hưởng của các loại nhiễu bên ngoài làm ảnh hưởng tới chất lượng điều khiển. Để tăng tính thích nghi cho bộ điều khiển, hệ logic mờ được đề xuất sử dụng với vai trò chỉnh định các ma trận tham số trong bộ điều khiển trượt sao cho phù hợp với vị trí và tốc độ thay đổi trạng thái hệ thống.

Sơ đồ bộ điều khiển tích hợp hệ logic mờ như hình 2.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển AFSMC

Trong đó ma trận tham số L được lựa chọn có dạng ma trận đường chéo: $L = \text{diag}([a; b; c])$, thông qua việc chỉnh định a, b và c ta sẽ chỉnh định được L từ đó thu được các ma trận tham số K_1, K_2 . Để chỉnh định tham số a ta sẽ sử dụng sai lệch điều khiển của khớp thứ nhất $e_1 = q_1 - r_1$ cùng đạo hàm của nó theo thời gian $\dot{e}_1$ và tham số b và c sẽ được chỉnh định dựa trên sai lệch điều khiển của khớp thứ hai và ba.

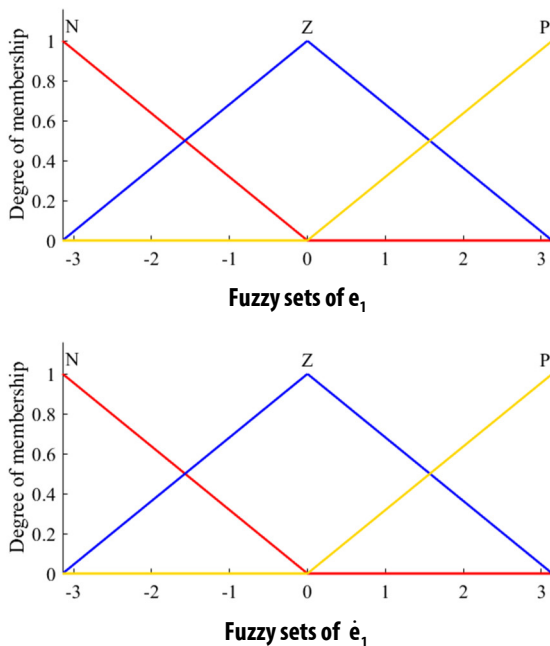
Quá trình chỉnh định cho a được thực hiện thông qua ba công đoạn chính: mờ hóa, chỉnh định mờ và giải mờ. Với bước mờ hóa, ta sẽ thực hiện xây dựng các tập mờ dựa trên tập vũ trụ của biến đầu vào e_1 từ đó xây dựng các tập mờ để phủ kín phạm vi giá trị của e_1 bao gồm: Negative (N), Zero (Z) và Positive (P) có dạng hàm liên thuộc là dạng tam giác sẽ được biểu diễn qua hình 3. Các tập mờ cho biến đầu vào e_1 được xây dựng tương tự. Sử dụng mô hình mờ là mô hình Sugeno, hàm đầu ra sẽ bao gồm ba hàm là hằng số với tên được số hóa là [N Z P] tương ứng với các giá trị $[a_1 \ a_2 \ a_3]$. Công việc chỉnh định mờ sẽ được tiến hành dựa trên hệ luật chỉnh định có dạng:

R^i : NẾU e_1 là A_1^i và e_2 là A_2^i THÌ a là B_i

Trong đó, $i = 1, 2, \dots, 9$ và R^i là luật chỉnh định thứ i , A_1^i , A_2^i và B_i đại diện cho các tập mờ đầu vào và hàm đầu ra tương ứng được mô tả qua bảng 1. Cuối cùng, đầu ra mờ đồng thời cũng là giá trị của a sẽ thu được từ công thức giải mờ WTAVER như sau:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^9 \bar{a}_i (\mu_{A_1^i}(e_1) \cdot \mu_{A_2^i}(e_2))}{\sum_{i=1}^9 (\mu_{A_1^i}(e_1) \cdot \mu_{A_2^i}(e_2))} \quad (10)$$

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



Hình 3. Tập mờ của các biến đầu vào e_1 và e_2 để chỉnh định a

Bảng 1. Luật chỉnh định tham số a

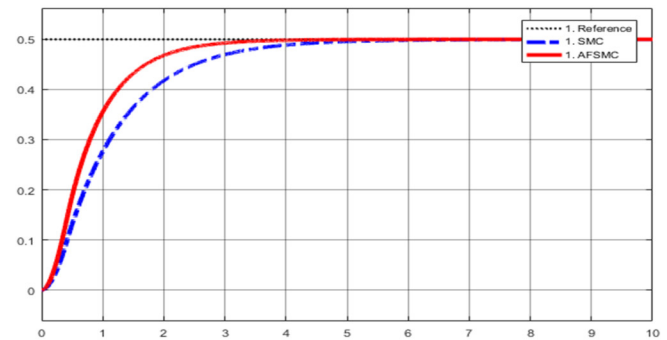
a		e_1		
		N	Z	P
e_1	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

Thực hiện chỉnh định b và c một cách hoàn toàn tương tự.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

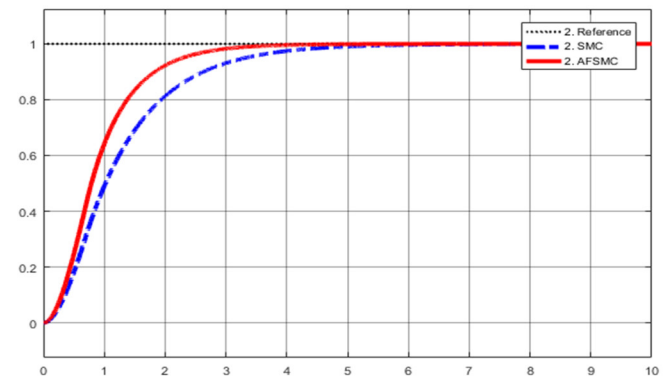
Công việc mô phỏng được thực hiện trên matlab simulink, thông số bộ điều khiển bao gồm $L = \text{diag}([1; 1; 1])$, $K_1 = \text{diag}([1; 1; 1])$, $K_2 = \text{diag}([1; 1; 1])$ còn đầu ra tương ứng với các tên số hóa của hệ mờ [N Z P] là [2,5 1,5 2,5]. Kết quả thu được:

Với tín hiệu đặt là hằng số, đáp ứng các khớp như sau:

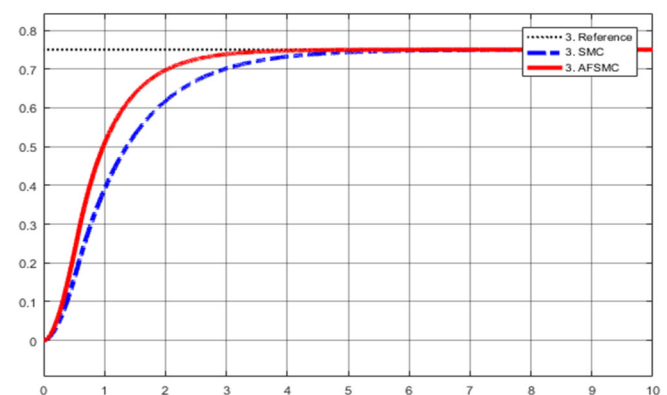


Hình 4. Đáp ứng đầu ra với khớp 1 khi tín hiệu đặt là hằng

Đáp ứng của khớp thứ nhất như hình 4. Bộ điều khiển AFSCM nhanh bám giá trị đặt, thời gian quá độ nhỏ hơn so với bộ SMC.



Hình 5. Đáp ứng đầu ra với khớp 2 khi tín hiệu đặt là hằng

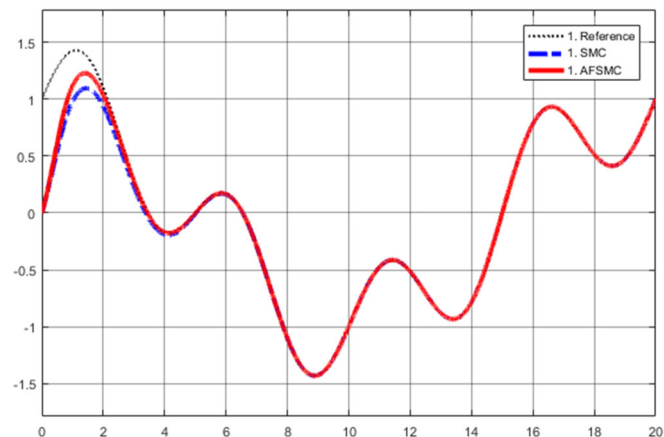


Hình 6. Đáp ứng đầu ra với khớp 3 khi tín hiệu đặt là hằng

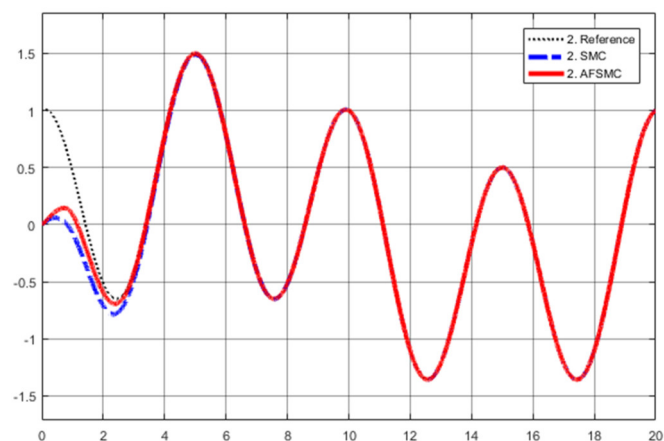
Tương tự, hình 5 và 6 là đáp ứng của khớp 2 và 3 trong trường hợp giá trị đặt là hằng số. Chất lượng của bộ AFSCM

vẫn tốt hơn so với bộ SMC. Cụ thể, thời gian quá độ của đáp ứng khớp 2 với bộ AFSMC chỉ là 2,5s, nhanh hơn so với bộ SMC với 4s. Lượng quá điều chỉnh ở cả 2 bộ điều khiển đều bằng 0.

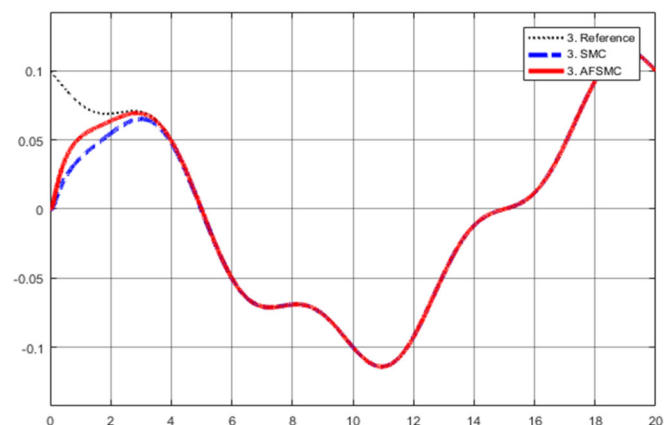
Với tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian, đáp ứng các khớp như sau:



Hình 7. Đáp ứng đầu ra với khớp 1 khi tín hiệu đặt thay đổi



Hình 8. Đáp ứng đầu ra với khớp 2 khi tín hiệu đặt thay đổi



Hình 9. Đáp ứng đầu ra với khớp 3 khi tín hiệu đặt thay đổi

Hình 7, 8, 9 lần lượt là đáp ứng của khớp 1, 2, 3 khi giá trị đặt thay đổi. Ở cả ba hình, bộ điều khiển trượt thích nghi

mở một lần lượt cho thấy chất lượng điều khiển tốt hơn so với bộ điều khiển trượt thông thường. Thời gian bám quỹ đạo của AFSMC nhanh hơn so với bộ SMC.

Có thể thấy cả hai bộ điều khiển đều cho chất lượng tốt những bộ điều khiển có thích nghi mở đáp ứng với sự thay đổi của tín hiệu tốt hơn, nhất là trong môi trường có nhiễu hệ thống.

5. KẾT LUẬN

Bài báo cho thấy chất lượng điều khiển của bộ điều khiển trượt thích nghi mở tốt hơn bộ điều khiển trượt thông thường. Khả năng bám quỹ đạo của bộ AFSMC nhanh và chính xác hơn so với bộ SMC. Điều này cho thấy, thành phần điều khiển mở trong bộ AFSMC phát huy ưu điểm trong khả năng thích nghi nhiễu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyen Thien Phuc, 2006. *Giao trình robot công nghiệp*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [2]. Thai Huu Nguyen, Phan Xuan Minh, Nguyen Cong Khoa, 2014. *Robust adaptive neural networks sliding mode control for three-freedom robot*. Vietnam J. Sci. Technol., vol. 52, no. 5, pp. 541–548.
- [3]. Ngo Quang Vi, 2012. *Thiết kế, chế tạo và điều khiển cánh tay robot 3 bậc tự do*. Science research, Hai Phong Private University.
- [4]. Tran Dinh Hoa, Nguyen Van Khiem, Tran Duc Thien, 2021. *Design, simulation, fabrication and control a 3-DOF planar robotic manipulator*. Journal of Technical Education Science, HCM City University of Science and Education, no. 64.
- [5]. Hwi-Su Kim, Jae-Bok Song, 2013. *Low-cost robot arm with 3-DOF counterbalance mechanism*. IEEE, ICRA, pp. 4183–4188.
- [6]. Ahmed F. Amer, Elsayed A. Sallam, Wael M. Elawady, 2011. *Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators*. Elsevier, pp. 4943–4953.
- [7]. A Deneve, S Moughamir, L Afilal, J Zaytoon, 2008. *Control system design of 3-DOF upper limbs rehabilitation robot*. Elsevier, pp. 4943–4953.

AUTHORS INFORMATION

Phi Hoang Nha, Nguyen Dang Hai

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry