

BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING BẮM QUỸ ĐẠO CỦA ROBOT 3 KHỚP RPP

BACKSTEPPING CONTROLLER FOR ORBIT TRACKING OF RPP 3 JOINT ROBOT

Trần Đức Thiện¹, Vũ Ngọc Sơn¹,
Phạm Văn Hùng¹, Phí Hoàng Nhã^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.298>

TÓM TẮT

Trong công nghiệp hiện đại, vai trò quan trọng của robot là một điều không thể không kể đến đối với các quá trình sản xuất tự động hóa. Robot nói chung và robot 3 bậc tự do RPP nói riêng là đối tượng đang nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu, nhất là trong lĩnh vực điều khiển. Bài toán điều khiển chủ yếu với lớp đối tượng này là điều khiển vị trí bám quỹ đạo nhằm nâng cao tính chính xác của robot khi hoạt động. Một trong những phương pháp dùng để thiết kế thuật toán điều khiển là sử dụng kỹ thuật Backstepping nhằm cải thiện chất lượng bám quỹ đạo, vị trí cho robot RPP đã được nhắc đến trong bài báo này. Tính ổn định trong hệ thống điều khiển được minh chứng bằng định lý Lyapunov và các kết quả được mô phỏng số bằng phần mềm Matlab. Kết quả của bài báo cho thấy chất lượng của bộ điều khiển Backstepping đề xuất đáp ứng khả năng bám quỹ đạo cho robot RPP rất tốt ngay cả khi có sự ảnh hưởng của nhiễu.

Từ khóa: Robot; điều khiển; Backstepping; RPP.

ABSTRACT

In modern industry, robot play an important role in the automated production process. Robot in general and 3 degree of freedom RPP robot in particular are the subject of much research attention, especially in the field of control. The main control problem with this class of objects is trajectory tracking control to improve the accuracy of the robot when operating. The controller design method using backstepping technique to improve trajectory tracking quality for RPP robot is presented in this article. The stability of the system is proven using the Lyapunov criterion and the results are numerically simulated using Matlab software. The upshot shows that the quality of the proposed Backstepping controller ensures very good trajectory tracking ability for the RPP robot even when affected by noise.

Keywords: Robot; control; Backstepping; RPP.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nhaph@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

1. GIỚI THIỆU

Robot là một trong những thiết bị tự động quan trọng, cần thiết trong đời sống - xã hội, và hơn hết là trong lĩnh vực môi trường công - nông nghiệp [1]. Robot công nghiệp được sử dụng ở nhiều lĩnh vực và ngành nghề như công nghiệp dệt may, ô tô, đóng tàu, luyện kim, công nghiệp sơn phủ,... Đó đều là những nhiệm vụ yêu cầu robot phải làm việc một cách ổn định và chính xác. Vậy nên, bài toán về điều khiển robot thực hiện bám quỹ đạo, vị trí đang nhận được nhiều sự quan tâm, nghiên cứu.

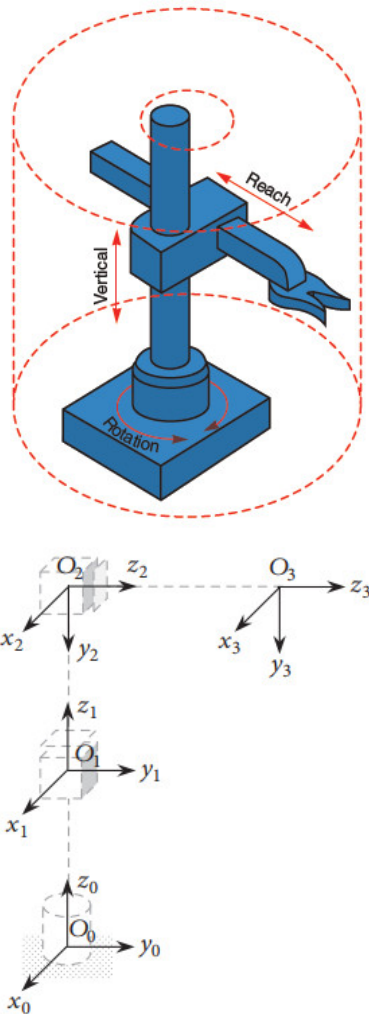
Nghiên cứu [2] thiết kế thuật toán điều khiển áp dụng đối với robot bằng cách sử dụng bộ điều khiển thích nghi trượt - nơ ron, nhưng thuật toán trên sử dụng mạng nơ ron nhân tạo nên nghiên cứu khá phức tạp và hơn hết, đối tượng của bài toán là robot có 3 bậc tự do nhưng không phải robot loại RPP. Công trình [3] đi sâu vào việc nghiên cứu chế tạo cơ khí cho cánh tay robot, bộ điều khiển được áp dụng trong nghiên cứu là bộ điều khiển dạng truyền thống để có thể điều khiển quỹ đạo chuyển động của cánh tay robot. Nghiên cứu [4-7] áp dụng đối tượng là robot có 3 bậc tự do, đều không phải là loại RPP. Công trình nghiên cứu gần đây nhất [8] đề xuất bộ điều khiển trượt thích nghi mờ dùng để điều khiển bám quỹ đạo đối với robot RPP, tuy nhiên, chất lượng bám quỹ đạo chưa thực sự thuyết phục và không nhắc đến sự ảnh hưởng của nhiễu. Như vậy, robot có 3 bậc tự do RPP vẫn còn rất ít được các công trình nghiên cứu quan tâm, chủ yếu những công trình đã được công bố trước đó một số chỉ áp dụng một số thuật toán điều khiển dạng truyền thống, chưa đánh giá ảnh hưởng của nhiễu hoặc đối tượng nghiên cứu điều khiển là các robot có trên thị trường khác, không phải loại RPP. Mặt khác, kỹ thuật điều khiển Backstepping là kỹ thuật điều khiển sử dụng cho một số đối tượng có tính phi tuyến mạnh, khả năng đáp ứng nhiễu tốt, không có hiện tượng

chattering như kỹ thuật điều khiển trượt [9, 10]. Do vậy, trong nghiên cứu này, thuật toán điều khiển Backstepping được sử dụng với mục đích điều khiển robot có 3 bậc tự do RPP để bám vị trí, quỹ đạo lộ trình đặt ra và có xét đến ảnh hưởng nhiễu.

Sau phần giới thiệu, phần tiếp theo của bài báo nghiên cứu sẽ nhắc lại mô hình toán mà đối tượng được nhắc đến là robot 3 bậc tự do RPP ở phần 2; phần 3 trình bày về thuật toán điều khiển Backstepping. Dựa vào đó, kết quả được mô phỏng số và trình bày ở phần 4, sau đó kết thúc là kết luận bài báo nghiên cứu.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC ROBOT RPP 3 BẬC TỰ DO

Trục hệ quy chiếu trong không gian được xác định là cơ sở của những mô hình toán học. Đặc biệt, mô hình toán cho robot thường dựa trên những phương trình toán học mô tả vị trí và hướng của động học các chất điểm có trong không gian. Trong phần 2, bài báo sẽ nhắc lại mô tả về mặt toán học đối với robot có 3 bậc tự do thực hiện chuyển động quay - tịnh tiến: RPP theo [8].



Hình 1. Hệ quy chiếu robot RPP 3 bậc tự do [8]

Nguyên lý về cấu tạo của Robot RPP 3 bậc tự do có 3 khớp thực hiện chuyển động $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ trong đó khớp số 1 là khớp chuyển động quay và hai khớp còn lại là khớp chuyển động tịnh tiến. Dựa trên nguyên lý cấu tạo trên, hình trụ tròn là trạng thái không gian hoạt động của Robot RPP.

Đối với đối tượng là Robot trong công nghiệp nói chung và loại robot sử dụng 3 bậc tự do RPP nói riêng, phương pháp Euler - Lagrange được sử dụng để tạo nên mô hình toán học, trong đó phương trình thể hiện mối tương quan giữa các biến trạng thái với lực hoặc mô men tác động đến các khớp. Phương trình về động lực học với đối tượng là Robot Planar có dạng sau:

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

Đối với phương trình (1), véc tơ $\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ trạng thái thể hiện các biến trạng thái của các khớp, biến $\dot{\underline{q}} - \ddot{\underline{q}}$ được nhắc đến là các đạo hàm (cấp một và hai) của véc tơ \underline{q} theo

thời gian, véc tơ $\underline{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ của các tín hiệu thực hiện điều khiển. Bên cạnh đó, ma trận $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ được trình bày là ma trận quán tính có đặc điểm là luôn đối xứng và được xác định là dương. Ngoài ra, ma trận $C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ đang được đại diện là thành phần tương hỗ, thành phần ly tâm của phương trình (1), véc tơ $G \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ được thể hiện với thành phần là gia tốc trọng trường tại thời điểm thực hiện nghiên cứu. Dựa vào phương pháp Euler-Lagrange đã có và theo [1] ta trình bày về mô hình toán của Robot RPP có 3 bậc tự do như sau:

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

Biến đổi thực hiện dạng ma trận, ta có:

$$\bar{M}\ddot{\underline{q}} + \underline{f} = \underline{u} \tag{3}$$

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

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

Mô hình toán (3) được sử dụng để tổng hợp thuật toán điều khiển trong phần tiếp theo.

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING CHO ROBOT RPP

3.1. Bộ điều khiển Backstepping cho robot RPP

Đặt biến trạng thái:

$$\begin{aligned} z_1 &= e = q - r \\ z_2 &= \dot{q} + \alpha \end{aligned} \tag{4}$$

Với e là sai số trong điều khiển và r là giá trị tín hiệu đặt.

Chọn hàm Lyapunov xác định dương:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \tag{5}$$

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

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

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

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

Chọn tín hiệu điều khiển:

$$u = -\bar{M}(z_1 + a_1 z_2 + \alpha) + \bar{f} \tag{7}$$

Khi đó:

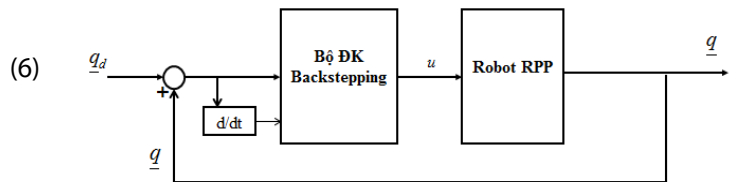
$$\dot{V}_q = -a_1 z_1^2 - a_1 z_2^2 < 0 \tag{8}$$

Như vậy, đạo hàm đối với V là âm, nên dựa trên tiêu chuẩn Lyapunov thì hệ thống sẽ ổn định với sai lệch điều khiển hội tụ về 0.

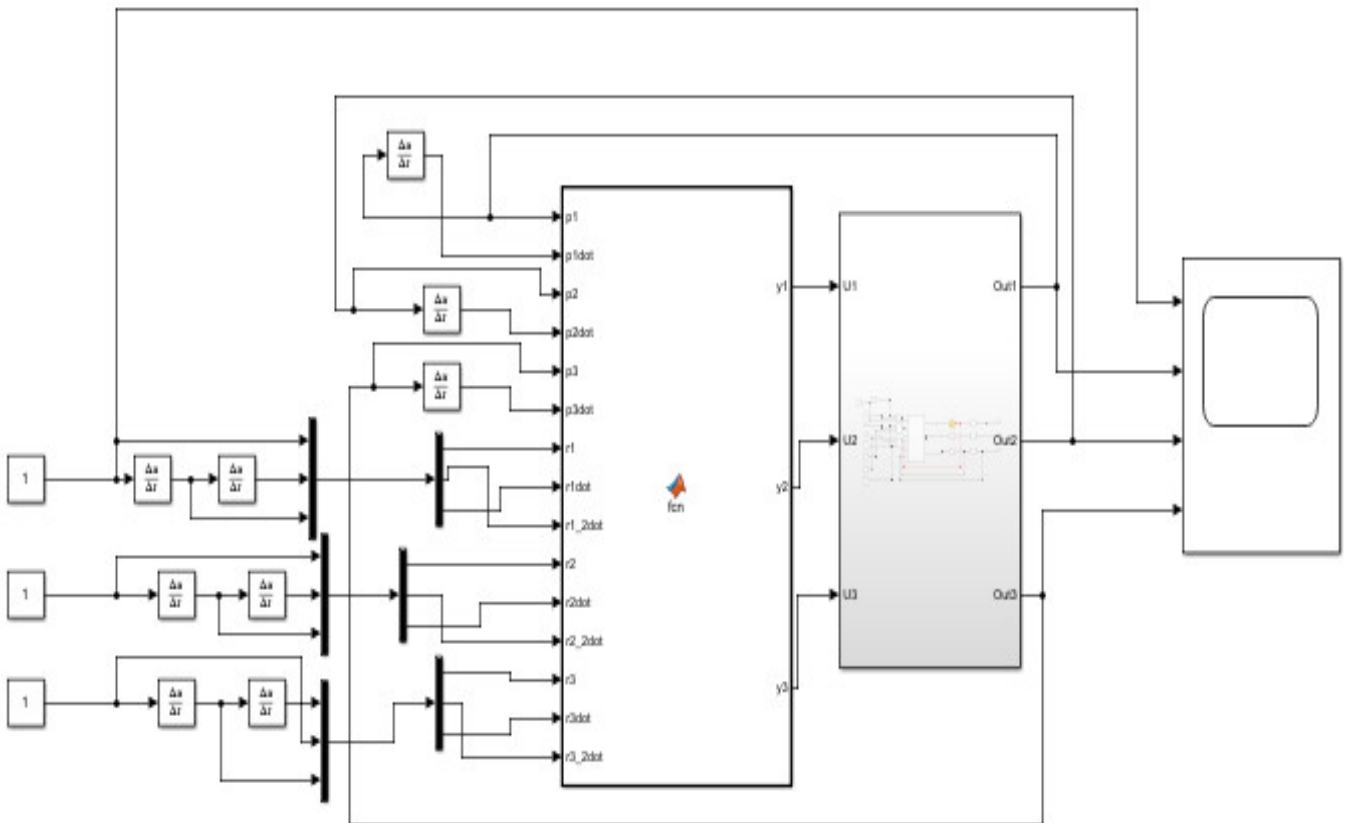
Các tham số được sử dụng trong bộ điều khiển là a_2, a_3 xác định tương tự.

3.2. Cấu trúc của hệ thống điều khiển cho robot RPP có 3 bậc tự do

Với thuật toán điều khiển sử dụng và thiết kế dựa trên kỹ thuật Backstepping, biến cần điều khiển chính là vị trí tại các khớp, gồm: khớp một là khớp quay và khớp hai và ba là khớp chuyển động tịnh tiến. Cấu trúc của một hệ thống đang được điều khiển sẽ biểu diễn ở hình 2, sơ đồ thực hiện hệ thống trên Simulink như hình 3.



Hình 2. Cấu trúc của một hệ thống sử dụng thuật toán điều khiển Backstepping



Hình 3. Cấu trúc của một hệ thống sử dụng thuật toán điều khiển Backstepping trên Simulink

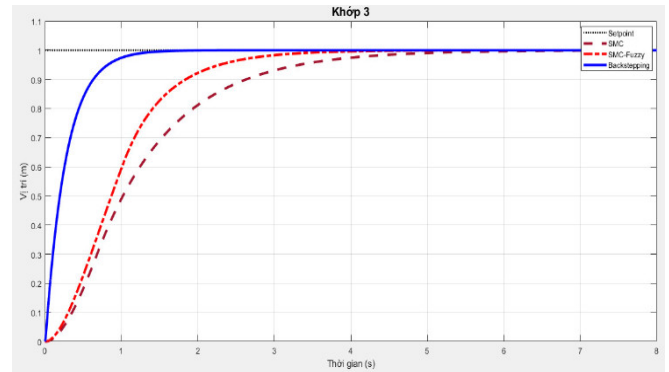
Bảng thông số robot RPP và tham số của bộ điều khiển sẽ được thể hiện ở bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đối tượng và tham số bộ điều khiển

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Chú thích	Tham số bộ điều khiển	Giá trị
m_1	1	kg	Khối lượng của khớp 1	a_1	5,5
m_2	1	kg	Khối lượng của khớp 2	a_2	50
m_3	1	kg	Khối lượng của khớp 3	a_3	6
g	9,8	m/s^2	Gia tốc		
l	1	m	Chiều dài của khớp 3		
J	0,33	$kg.m^2$	Mô men quán tính của vật m so với khớp 3		

4. MÔ PHỎNG SỐ

Kết quả mô phỏng ở phần 4 được thực hiện dựa trên phần mềm Matlab/Simulink với nhiều trường hợp giả thiết khác nhau nhằm đánh giá, phân tích khả năng đáp ứng của bộ điều khiển Backstepping so với bộ điều khiển trượt (SMC) và trượt mờ (SMC-Fuzzy). Một số thông số trong bộ điều khiển và cấu trúc hệ thống điều khiển cũng như kết quả mô phỏng, đánh giá kiểm tra đối với chất lượng bộ điều khiển trượt và trượt mờ đã được thực hiện ở nghiên cứu [8]. Sau đây, nhóm tác giả tiến hành so sánh bộ điều khiển Backstepping với một số bộ điều khiển khác (các tham số bộ điều khiển giữ nguyên) được triển khai tại nghiên cứu này.



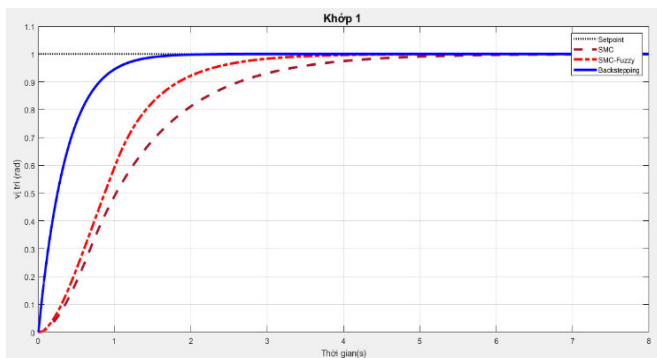
Hình 6. Tín hiệu đầu ra của khớp ba với tín hiệu đặt dạng hằng số

Trường hợp với giá trị đặt dạng hằng số, tín hiệu đáp ứng tại vị trí khớp 1, 2, 3 được trình bày lần lượt trong các hình 4, 5, 6. Các chỉ tiêu chất lượng phân tích đối với khớp 3 được biểu diễn ở bảng 2.

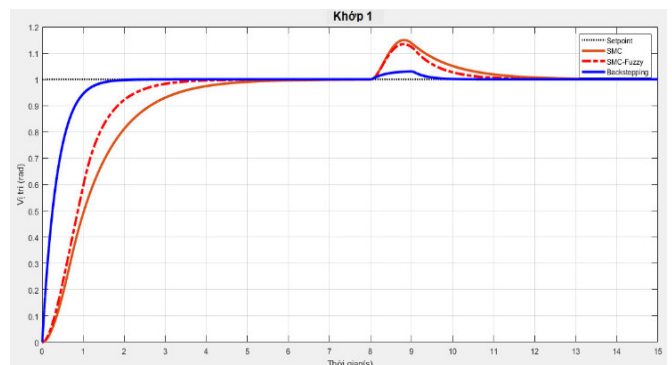
Bảng 2. Các chỉ tiêu chất lượng điều khiển của khớp 3 trường hợp chưa xét đến nhiễu

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

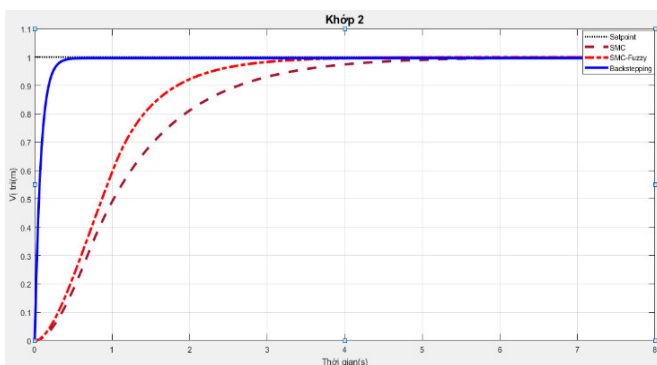
Kết quả ở các hình 4, 5 và 6 cho thấy khả năng bám của các khớp 1, 2, 3 khi sử dụng thuật toán điều khiển Backstepping là tốt hơn nhiều so với thuật toán điều khiển dạng trượt và trượt thích nghi mờ.



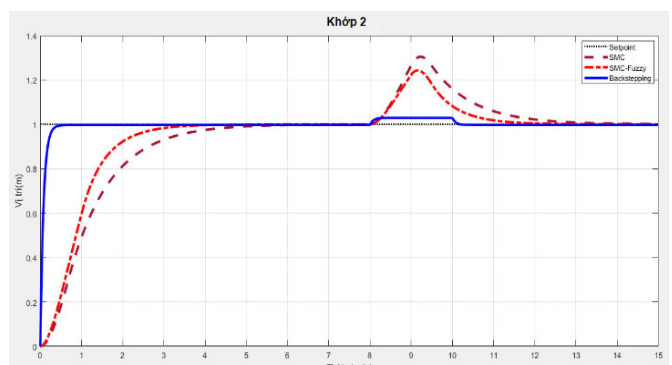
Hình 4. Tín hiệu đầu ra của khớp một với tín hiệu đặt dạng hằng số



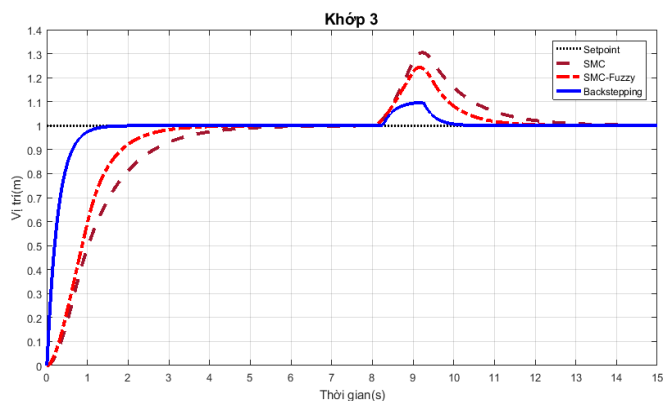
Hình 7. Tín hiệu đầu ra của khớp 1 khi có nhiễu



Hình 5. Tín hiệu đầu ra của khớp hai với tín hiệu đặt dạng hằng số



Hình 8. Tín hiệu đầu ra của khớp 2 khi có nhiễu



Hình 9. Tín hiệu đầu ra với khớp 3 khi có nhiễu

Tương tự, trường hợp có nhiễu điều khiển tác động ở thời điểm xác lập 8s, đáp ứng đầu ra của các khớp được biểu diễn ở hình 7, 8 và 9. Bảng 3 là bảng thông số chất lượng điều khiển khớp 3 của hệ thống khi xét đến nhiễu.

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

	Backstepping	Trượt mờ	Trượt
Độ quá điều chỉnh	0,65%	21,5%	25%
Thời gian quá độ	1s	2s	3s
Sai số trong quá trình xác lập	0	0	0

Khi có ảnh hưởng của nhiễu tác động đối với đối tượng thực hiện nghiên cứu, bộ điều khiển Backstepping vẫn khẳng định chất lượng của bộ điều khiển ở mức tốt khi độ quá điều chỉnh rất nhỏ, thời gian quá độ ngắn hơn so với những bộ điều khiển khác như: bộ điều khiển trượt và trượt mờ. Như vậy, với robot RPP này, bộ điều khiển Backstepping đề xuất ở trong nghiên cứu là phù hợp hơn so với hai bộ điều khiển trượt và trượt thích nghi mờ.

5. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu đã cho thấy khả năng điều khiển được đề cập đến trong bộ điều khiển Backstepping là tốt hơn so với bộ điều khiển trượt và trượt thích nghi mờ. Vị trí và quỹ đạo bám của các khớp sử dụng bộ Backstepping là nhanh và chính xác ngay cả khi chịu ảnh hưởng liên quan đến nhiễu. Bộ điều khiển Backstepping là bộ điều khiển phù hợp với đối tượng robot RPP trong những bài toán thực hiện điều khiển bám vị trí, quỹ đạo, hoàn toàn có thể thực thi trong các hệ vật lý thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyen Thien Phuc, *Industrial robotics*. Science and Technics Publishing House, Hanoi, 2006. (in Vietnamese)

[2]. Thai Huu Nguyen, Phan Xuan Minh, Nguyen Cong Khoa, "Robust adaptive neural networks sliding mode control for three-freedom robot," *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 52, 5, 541-548, 2014.

[3]. Ngo Quang Vi, *Design, manufacture and control a 3-degree-of-freedom robot arm*. Haiphong University of Management and Technology, 2012. (in Vietnamese)

[4]. Tran Dinh Hoa, Nguyen Van Khiem, Tran Duc Thien, "Design, simulation, fabrication and control a 3-DOF planar robotic manipulator," *Journal of Technical Education Science, HCM City University of Science and Education*, 64, 2021.

[5]. Hwi-Su Kim, Jae-Bok Song, "Low-cost robot arm with 3-DOF counterbalance mechanism," *IEEE, ICRA*, 4183-4188, 2013.

[6]. Ahmed F. Amer, Elsayed A. Sallam, Wael M. Elawady, "Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators," *Applied Soft Computing*, 11, 8, 4943-4953, 2011.

[7]. A Deneve, S Moughamir, L Afilal, J Zaytoon, "Control system design of 3-DOF upper limbs rehabilitation robot," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 89, 2, 202-214, 2008.

[8]. Phi Hoang Nha, Nguyen Dang Hai, "Adaptive fuzzy sliding mode control for three degrees of freedom robot RPP," *Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry*, 58, 6B, 19-22, 2022.

[9]. Marcin Morawiec, P. Strankowski, A. Lewicki, J. Guzinski, F. Wilczynski, "Feedback control of Multiphase induction machines with Backstepping Technique," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 6, 4305-4314, 2020.

[10]. J. Huang, T. Zhang, Y. Fan, J. Sun, "Control of rotary inverted pendulum using model free backstepping technique," *IEEE Access*, 7, 96965-96973, 2019.

AUTHORS INFORMATION

Tran Duc Thien, Vu Ngoc Son, Pham Van Hung, Phi Hoang Nha

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam