

# ỔN ĐỊNH VỊ TRÍ TAY MÁY ROBOT DỰA VÀO ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BỀN VỮNG VỚI HIỆU SUẤT CAO

## STABILIZATION POSITION OF ROBOT MANIPULATOR BASED ON ROBUST SLIDING MODE CONTROL WITH HIGH PERFORMANCE

NGUYỄN TRẦN THANH NHÀN<sup>a</sup>, PHẠM THANH TÙNG

*Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long*

*<sup>a</sup>Tác giả liên hệ: thnhanltd@gmail.com*

***Nhận bài(Received): 27/01/2025; Phản biện(Reviewed): 07/02/2025; Chấp nhận(Accepted): 24/02/2025***

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt bền vững với hiệu suất cao cho tay máy robot. Đây là hệ thống phi tuyến yêu cầu độ chính xác bám quỹ đạo cao và duy trì hiệu quả động học của tay máy cho sự phát triển công nghiệp. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế đảm bảo các vị trí thực tế của tay máy robot bám theo các vị trí cho trước với hàm signum được thay thế bằng hàm hyperbolic tangent. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả và tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất với thời gian tăng đạt 0,4962(s), thời gian xác lập là 1,0483(s), sai số xác lập là 0(rad), độ vọt lố là 0(%), tích phân trị tuyệt đối sai số (IAE - Integral Absolute Error) là 0,1398, tích phân bình phương sai số (ISE - Integral Square Error) là 0,0378 cho thanh 1 và tương ứng với thanh 2 là 0,5377(s), 1,3956(s), 0(rad), 0(%), 0,1395 và 0,0316.

**Từ khóa:** điều khiển trượt, bền vững, tay máy robot, MATLAB/Simulink.

### ABSTRACT

*This article presents a method to design a robust sliding mode control with high performance (RSMC-HP) for robot manipulators. This is a nonlinear system that requires high trajectory tracking accuracy and effectively maintains the kinematics of the manipulator for industrial development. The proposed controller is designed to ensure that the actual positions of the robot manipulator follow the given positions with the signum function replaced by the hyperbolic tangent function. The stability of the system is proven by Lyapunov theory. Simulation results with MATLAB/Simulink show the effectiveness and robustness of the proposed controller with the rising time achieves 0.4962(s), the settling time is 1.0483(s), the steady state error is 0(rad), the percent overshoot is 0(%), IAE (Integral Absolute Error) is 0.1398, ISE (Integral Square Error) is 0.0378 for link 1 and link 2 are 0.5377(s), 1.3956(s), 0(rad), 0(%), 0.1395, 0.0316, respectively.*

**Keywords:** sliding mode control, robust, robot manipulator, MATLAB/Simulink.

### 1. GIỚI THIỆU

Robot công nghiệp (tay máy công nghiệp) được sử dụng rộng rãi trong quá

trình sản xuất [1]. Đây là hệ thống phi tuyến yêu cầu độ chính xác bám quỹ đạo cao và duy trì hiệu quả động học của tay

máy cho sự phát triển công nghiệp [2].

Thời gian gần đây, nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm phát triển và hoàn thiện thuật toán điều khiển cho tay máy robot hai bậc tự do, chẳng hạn như: bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo [3], nghiên cứu đã xây dựng được giải thuật huấn luyện mạng nơ-ron online giúp điều khiển đối tượng được linh hoạt, giảm thiểu sai số do nhiễu tác động từ bên ngoài và xây dựng được phương pháp cập nhật hằng số học để mạng hội tụ nhanh nhằm tăng vận tốc di chuyển của tay máy. Phương pháp điều khiển trở kháng tích cực kết hợp mạng nơ-ron [4] để điều khiển hồi tiếp tay máy robot dựa trên các đại lượng đo được (vị trí, tốc độ cũng như ngoại lực tác động), và khả năng nhận dạng các tham số động học, động lực học với mục tiêu có thể điều khiển tay robot bám chính xác quỹ đạo. Kỹ thuật điều khiển trượt [5], [6], so với phương pháp PID (vi tích phân tỷ lệ) truyền thống bộ điều khiển trượt có ưu điểm luôn ổn định, bền vững đảm bảo vị trí và lực tương tác của điểm tác động cuối luôn bám theo giá trị đặt trước kể cả khi tham số động lực học cánh tay robot thay đổi. Bộ điều khiển chuyển mạch dựa trên luật tiếp cận được điều chỉnh thích nghi cho các hệ thống điều khiển robot sử dụng phương pháp quan sát nhiễu (DO) [7], bộ DO tiêu chuẩn được sử dụng để ước lượng các nhiễu động chưa biết của tay máy, luật tiếp cận được điều chỉnh thích nghi được thiết lập để tự động điều chỉnh độ lợi chuyển mạch của điều khiển trượt bền vững và đảm bảo hơn nữa sự xuất hiện của mặt trượt thời gian hữu hạn đã thiết lập. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển được phát triển đạt được khả năng bám nhanh chóng, giảm chattering của hệ thống và cải thiện độ bền vững của tay máy. Kỹ thuật điều khiển bền vững [8], [9] bao gồm

điều khiển trượt sửa đổi và điều khiển cuốn chiếu, kết quả mô phỏng chứng minh rằng điều khiển trượt sửa đổi bền vững hơn, chủ yếu là dưới tác động của các biến thể bên ngoài và độ bất định. Bộ điều khiển nơ-ron trượt thích nghi nhanh (AFSNC) [10], thuật ngữ thích nghi được sử dụng để giảm sự bất định do động lực học không được mô hình hóa. Sai số bám tiệm cận hội tụ về 0 theo định lý ổn định Lyapunov. Kết quả thí nghiệm cho thấy phương pháp điều khiển được đề xuất thực hiện bám chính xác quỹ đạo mong muốn trong thời gian hữu hạn. Kỹ thuật logic mờ đối phó với các nhiễu tham số mô hình đã được đề cập [11], kết quả mô phỏng cho thấy độ bền vững, đáp ứng nhanh, khả năng loại bỏ nhiễu và khả năng bám tốt. Mạng nơ-ron sóng mờ cấu trúc động (FWNNs) [12], FWNN bốn lớp trong cấu trúc động FWNN được xây dựng trên cơ sở các quy tắc mờ liên kết với hàm wavelet, bằng cách sử dụng FWNN cấu trúc động, hệ thống điều khiển đề xuất đạt được hiệu suất bám mong muốn, sự ổn định và bền vững. Điều khiển dự đoán mô hình [13] để điều khiển cánh tay robot từ cấu hình ban đầu đến cấu hình cuối cùng bằng cách sử dụng phương pháp điều khiển dự đoán bằng cách giảm thiểu tiêu chí bậc hai. Mô hình hóa bằng SimMechanics và bộ điều khiển tích hợp vi phân tỷ lệ - mờ (Proportional Derivative-Fuzzy Logic: PD-FL) để điều khiển vị trí điểm - điểm và bám quỹ đạo (hình tam giác và hình thoi) robot 2 bậc tự do [14], bộ điều khiển PD-FL có ưu điểm là ít luật mờ, giúp khắc phục được vấn đề về thời gian tính toán của bộ điều khiển logic mờ. Bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ (PID: Proportional Integral Derivative) và hồi tiếp vi phân phái sinh (PDF: Pseudo Derivative Feedback) được so sánh trong [15], kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán điều khiển PDF tỏ ra vượt trội hơn thuật toán điều khiển PID bằng

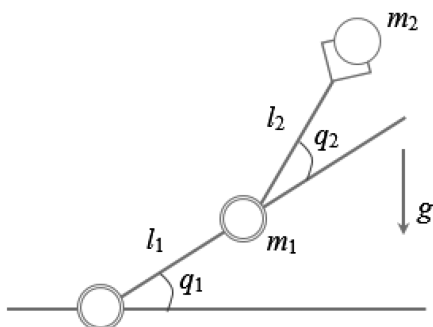
cách so sánh các đáp ứng trong MATLAB. Độ vọt lố xuất hiện trong thuật toán PID và không xuất hiện trong thuật toán PDF.

Mục tiêu của nghiên cứu này là thiết kế bộ điều khiển trượt bền vững với hiệu suất cao để điều khiển bám quỹ đạo tay máy robot 2 bậc tự do. Hàm signum trong điều khiển trượt truyền thống được thay thế bằng hàm hyperbolic tangent (còn gọi là hàm *tanh*) để nâng cao hiệu quả điều khiển và khắc phục hiện tượng dao động với tần số cao quanh mặt trượt (hay hiện tượng chattering). Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của bộ điều khiển đề xuất trong nghiên cứu này được so sánh với bộ điều khiển PD [14], PID và PDF [15]

Bài báo được tổ chức gồm 4 phần như sau: Phần 2 trình bày mô hình toán học của tay máy robot; bộ điều khiển trượt bền vững với hiệu suất cao cho tay máy robot được thiết kế trong Phần 3 và Phần 4 là kết luận.

## 2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA TAY MÁY ROBOT

Hệ tay máy robot 2 bậc tự do trong mặt phẳng thẳng đứng được trình bày như Hình 1 [16], [17], [18].



Hình 1. Mô hình tay máy robot 2 bậc tự do

Trong đó,  $m_i$  và  $l_i$  là khối lượng và chiều dài của thanh  $i$  ( $i=1, 2$ ),  $g$  là gia tốc trọng trường và  $q_i$  là vị trí của thanh  $i$ ,  $l_{ci}$  là khoảng cách từ khớp ( $i-1$ ) đến tâm khối lượng của thanh  $i$  và  $I_i$  là mômen quán tính

của thanh  $i$  về một trục đi qua tâm khối lượng của thanh  $i$ .

Phương trình động học tay máy robot được mô tả như [16], [17], [18]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_d \quad (1)$$

với

$$M(q) = \begin{bmatrix} p_1 + p_2 + 2p_3 \cos q_2 & p_2 + p_3 \cos q_2 \\ p_2 + p_3 \cos q_2 & p_2 \end{bmatrix}$$

là ma trận quán tính xác định dương

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -p_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -p_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ p_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix}$$

là ma trận quán tính

$$G(q) = \begin{bmatrix} p_4 g \cos q_1 + p_5 g \cos(q_1 + q_2) \\ p_5 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

là vector quán tính

$$p_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1, p_2$$

$$= m_2 l_{c2}^2 + I_2, p_3 = m_2 l_1 l_{c2}$$

$\tau_d = 20 \text{sign}(\dot{q})$  là nhiễu chưa biết,  $q$  là tọa độ chung tổng quát,  $\tau$  là mômen quay của khớp (ngõ vào điều khiển).

Trong kỹ thuật thực tế,  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$  và  $G(q)$  trong (1) thường chưa biết và có thể được biểu diễn như (2), (3) và (4) sau:

$$M(q) = M_0(q) + E_M \quad (2)$$

$$C(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + E_C \quad (3)$$

$$G(q) = G_0(q) + E_G \quad (4)$$

Trong đó,  $E_M$ ,  $E_C$  và  $E_G$  là sai số mô hình của  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$  và  $G(q)$ .

## 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BỀN VỮNG VỚI HIỆU SUẤT CAO CHO TAY MÁY ROBOT

### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Sai số bám vị trí được định nghĩa như (5) sau:

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (5)$$

với  $q_d(t)$  là vị trí mong muốn và  $q(t)$  là vị trí thực tế.

Mặt trượt được định nghĩa như (6) sau [19]:

$$s = \dot{e} + \kappa e \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d \\ &= M(q)(\ddot{q}_s - \dot{s}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_s - s) + G(q) + \tau_d \\ &= M(q)\ddot{q}_s + C(q, \dot{q})\dot{q}_s + G(q) - M(q)\dot{s} - C(q, \dot{q})s + \tau_d \\ &= M_0(q)\ddot{q}_s + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_s + G_0(q) + E' - M(q)\dot{s} - C(q, \dot{q})s + \tau_d \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó,  $E' = E_M\ddot{q}_s + E_C\dot{q}_s + E_G$

Bộ điều khiển cho robot được thiết kế như (1) sau:

$$\tau = \tau_m + K_p s + K_i \int s dt + \tau_s \quad (10)$$

trong đó,  $K_p > 0$ ,  $K_i > 0$ ,  $\tau_m$  ký hiệu thành phần điều khiển dựa trên mô hình

trong đó,  $\kappa > 0$

Định nghĩa:

$$\dot{q}_s = \dot{s}(t) + \dot{q}(t) = \dot{q}_d + \kappa e \quad (7)$$

Đạo hàm của (7), ta được (8):

$$\ddot{q}_s = \dot{s}(t) + \ddot{q}(t) = \ddot{q}_d + \kappa \dot{e} \quad (8)$$

Từ (1), ta có:

danh định,  $\tau_s$  là thành phần bền vững, và:

$$\tau_m = M_0(q)\ddot{q}_s + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_s + G_0(q) \quad (11)$$

$$\tau_s = K_s \text{sign}(s) \quad (12)$$

với  $K_s = \text{diag}[k_{sii}]$ ,  $k_{sii} \geq |E_i|$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$

và  $E = E' + \tau_d$ .

Từ (9) đến (12), ta có:

$$\begin{aligned} M_0(q)\ddot{q}_s + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_s + G_0(q) - M(q)\dot{s} - C(q, \dot{q})s + E' + \tau_d \\ = M_0(q)\ddot{q}_s + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_s + G_0(q) + K_p s + K_i \int_0^t s dt + K_s \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (13)$$

Vì thế,

$$M(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s + K_i \int_0^t s dt = -K_p s - K_s \text{sign}(s) + E \quad (14)$$

### 3.2. Phân tích ổn định

Hàm Lyapunov kiểu tích phân được thiết kế như (15):

$$V = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \left( \int_0^t s d\tau \right)^T K_i \left( \int_0^t s d\tau \right) \quad (15)$$

Sau đó,

$$\dot{V} = s^T \left[ M\dot{s} + \frac{1}{2} \dot{M}s + K_i \int_0^t s d\tau \right] \quad (16)$$

Xét đặc tính đối xứng nghiêm của phương trình động học robot,  $s^T (\dot{M} - 2C)s = 0$ , ta có (17)

$$\dot{V} = s^T \left[ M\dot{s} + Cs + K_i \int_0^t s d\tau \right] \quad (17)$$

Thế (14) vào (17), ta có (18):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^T K_p s - s^T K_s \text{sign}(s) + s^T E \\ &= -s^T K_p s - \sum_{i=1}^n K_{sii} |s|_i + s^T E \end{aligned} \quad (18)$$

Xét  $k_{sii} \geq |E_i|$ , sau đó:

$$\dot{V} \leq -s^T K_p s \leq 0 \quad (19)$$

Từ đây,

$$\lambda_{\min}(K_p) \int_0^t s^T s \leq \int_0^t s^T K_p s \leq V(0) \quad (20)$$

trong đó,  $\lambda_{\min}(K_p)$  là trị riêng cực tiểu của  $K_p$ .

Vì  $V(0)$  và  $\lambda_{\min}(K_p)$  là các hằng số dương, nó theo sau là  $s \in L_2^n$ . Tương tự,  $e \in L_2^n \cap L_\infty^n$ ,  $e$  là liên tục,  $e \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$  và  $\dot{e} \in L_2^n$ .

Hơn thế nữa, vì  $\dot{V} \leq -s^T K_p s \leq 0$ , nó theo sau là  $0 \leq V \leq V(0), \forall t \geq 0$ . Vì thế,  $V(t) \in L_\infty$ , ngụ ý rằng  $\int_0^t s d\tau$  bị giới hạn.

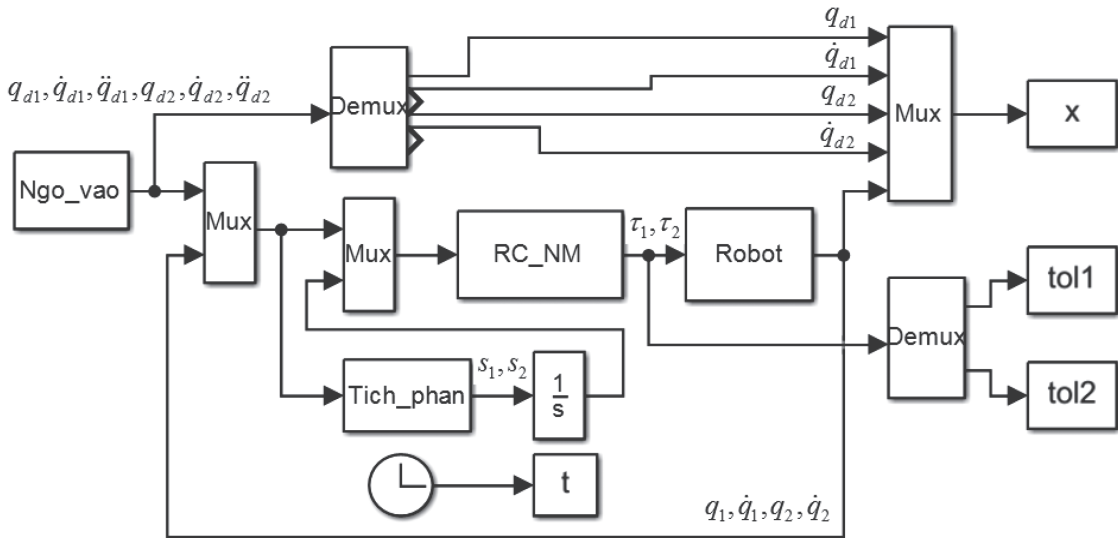
Từ  $e \in L_2^n \cap L_\infty^n$ ,  $\dot{e} \in L_2^n$  và  $\dot{q}_d, \ddot{q}_d \in L_\infty^n$ , ta có thể kết luận rằng  $\dot{q}_s \in L_\infty^n$  và  $\ddot{q}_s \in L_\infty^n$  bằng cách quan sát rằng  $s \in L_2^n$  và từ  $q_d, \tau_s \in L_\infty^n$ , ta có thể kết luận rằng  $\dot{s} \in L_\infty^n$  từ (14) và  $\tau \in L_\infty^n$  từ (10).

Sử dụng  $s \in L_2^n$  và  $\dot{s} \in L_\infty^n$ , vì thế  $s \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ , và  $\dot{s} \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ .

Để đạt hiệu quả cao trong điều khiển tay máy robot, nghiên cứu tiến hành thay thế hàm signum trong (12) bằng hàm hyperbolic tangent (còn gọi là hàm *tanh*) nhằm khắc phục hiện tượng dao động tần số cao quanh mặt trượt trong phương pháp điều khiển trượt truyền thống.

**3.3. Kết quả và thảo luận**

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt bền vững dựa vào mô hình danh định với hiệu suất cao (RSMC-HP: Robust Sliding Mode Control with High Performance) cho tay máy robot trong MATLAB/Simulink như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển để xuất cho tay máy robot trong MATLAB/Simulink

Chọn  $p = [2,9 \ 0,76 \ 0,87 \ 3,04 \ 0,87]^T$ , các trạng thái ban đầu của tay máy robot là  $q_0 = [0,09 \ -0,09]^T$  và  $\dot{q}_0 = [0,0 \ 0,0]^T$ , và  $M_0 = 0,8M$ ,  $C_0 = 0,8C$ ,  $G_0 = 0,8G$ . Quỹ đạo mong muốn là  $q_{d1} = q_{d2} = 0,5(rad)$  và  $\dot{q}_{d1} = 0,5 \sin(\pi t)$ ,  $\dot{q}_{d2} = \sin(\pi t)$ . Các thông số của bộ điều khiển được chọn là:

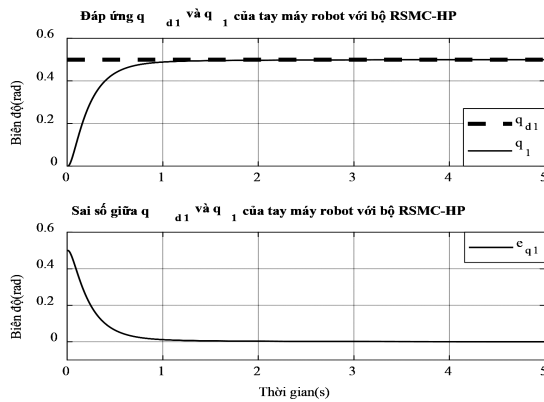
$$K_p = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, \quad K_i = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix},$$

$$K_s = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix} \text{ và } \kappa = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}.$$

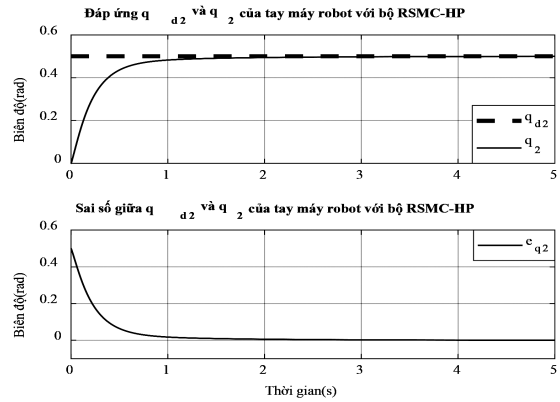
Hình 3 và Hình 4 trình bày đáp ứng và sai số thực tế của  $q_1$  và  $q_2$  tay máy robot với bộ điều khiển RSMC-HP khi  $q_{d1} = q_{d2} = 0,5(rad)$ . Vị trí góc quay thực tế của thanh 1 ( $q_1$ ) hội tụ về góc quay đặt trước ( $q_{d1}$ ) với thời gian tăng đạt 0,4962(s), thời gian xác lập là 1,0483(s), sai số xác lập là 0(rad), độ vọt lố là 0(%), IAE đạt 0,1398, ISE đạt 0,0378 và tương ứng với

thanh 2 là 0,5377(s), 1,3956(s), 0(rad), 0(%), 0,1395 và 0,0316. Các chỉ tiêu chất lượng này được trình bày trong Bảng 1, Bảng 2 và được so sánh với bộ điều khiển PD (Proportional Derivative) [14], PID

(Proportional Integral Derivative) và PDF (Pseudo Derivative Feedback) [15]. Kết quả so sánh cho thấy sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất áp dụng cho tay máy robot 2 bậc tự do trong nghiên cứu này.



Hình 3. Đáp ứng và sai số của thanh 1 với bộ điều khiển RSMC-HP khi  $q_{d1}=0,5(\text{rad})$



Hình 4. Đáp ứng và sai số của thanh 2 với bộ điều khiển RSMC-HP khi  $q_{d2}=0,5(\text{rad})$

Bảng 1. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của thanh 1 bộ điều khiển RSMC-HP

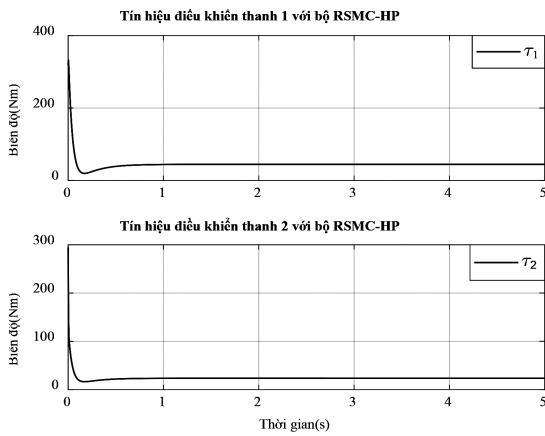
| $q_1$           | Thời gian tăng (s) | Thời gian xác lập (s) | Độ vọt lố (%) | Sai số xác lập (rad) | IAE    | ISE    |
|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------|--------|
| <b>RSMC-HP</b>  | 0,4962             | 1,0483                | 0             | 0                    | 0,1398 | 0,0378 |
| <b>PD [14]</b>  | 0,1539             | 1,732                 | 9,431         | 0                    | -      | -      |
| <b>PID [15]</b> | 0,5366             | 6,3971                | 49,9970       | -                    | -      | -      |
| <b>PDF [15]</b> | 0,5753             | 1,0984                | 0,0850        | -                    | -      | -      |

Bảng 2. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của thanh 2 bộ điều khiển RSMC-HP

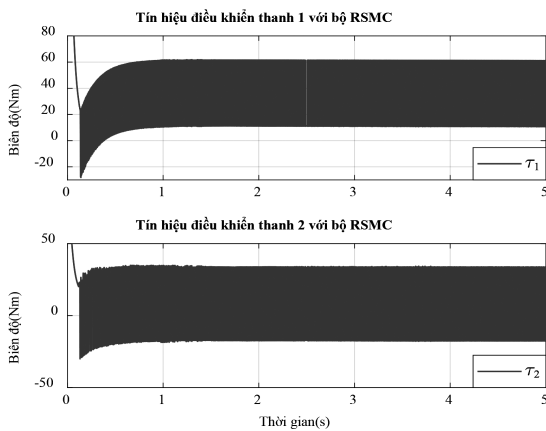
| $q_2$           | Thời gian tăng (s) | Thời gian xác lập (s) | Độ vọt lố (%) | Sai số xác lập (rad) | IAE    | ISE    |
|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------|--------|
| <b>RSMC-HP</b>  | 0,5377             | 1,3956                | 0             | 0                    | 0,1395 | 0,0316 |
| <b>PD [14]</b>  | 0,1042             | 0,495                 | 10,556        | 0                    | -      | -      |
| <b>PID [15]</b> | 0,8248             | 6,7731                | 31,2844       | -                    | -      | -      |
| <b>PDF [15]</b> | 0,6441             | 1,3293                | 5,5e-6        | -                    | -      | -      |

Tín hiệu điều khiển của thanh 1 ( $\tau_1$ ) và 2 ( $\tau_2$ ) với bộ điều khiển đề xuất cho tay máy robot được trình bày ở Hình 5. Hiện tượng chattering trong bộ điều khiển RSMC-HP đã

được khắc phục so với bộ điều khiển RSMC truyền thống (Hình 6). Điều này chứng tỏ hiệu quả của bộ điều khiển RSMC-HP (hàm  $\tanh$ ) cho tay máy robot.



**Hình 5. Tín hiệu điều khiển thanh 1 và 2 với bộ điều khiển RSMC-HP**

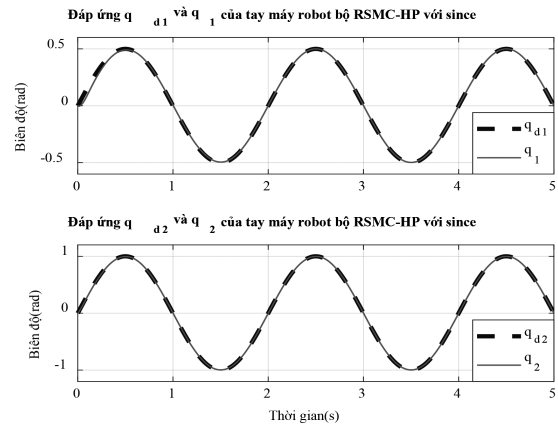


**Hình 6. Tín hiệu điều khiển thanh 1 và 2 với bộ điều khiển RSMC với hàm signum**

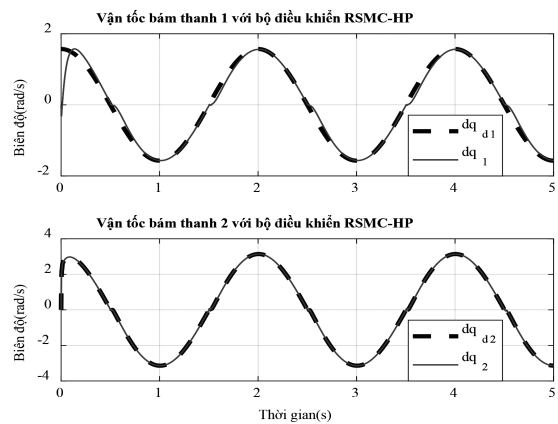
Đáp ứng và vận tốc bám thực tế của tay máy robot với bộ điều khiển RSMC-HP khi  $q_{d1}=0,5\sin(\pi t)$  và  $q_{d2}=\sin(\pi t)$  được trình bày trong Hình 7 và Hình 8. Các vị trí ( $q_1$  và  $q_2$ ) và vận tốc thực tế ( $\dot{q}_1$  và  $\dot{q}_2$ ) của tay máy robot vẫn hội tụ về vị trí ( $q_{d1}$  và  $q_{d2}$ ) và vận tốc mong muốn ( $\dot{q}_{d1}$  và  $\dot{q}_{d2}$ ) với sai số xác lập tiến về 0.

Hình 9 và Hình 10 trình bày đáp ứng thực tế của tay máy robot khi ngõ vào  $q_{d1}=0,5(\text{rad})$ ,  $q_{d2}=0,5(\text{rad})$  và  $\dot{q}_{d1}=0,5\sin(\pi t)$ ,  $\dot{q}_{d2}=\sin(\pi t)$  tương ứng, trong trường hợp có nhiễu tác động ở ngõ ra của tay máy với công suất 0,0001(w), thời gian lấy mẫu 0,01(s). Các vị trí thực tế ( $q_1$  và  $q_2$ ) của tay

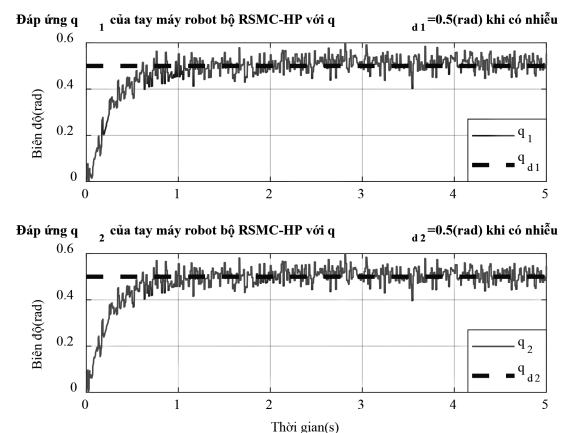
máy robot vẫn hội tụ về vị trí mong muốn ( $q_{d1}$  và  $q_{d2}$ ).



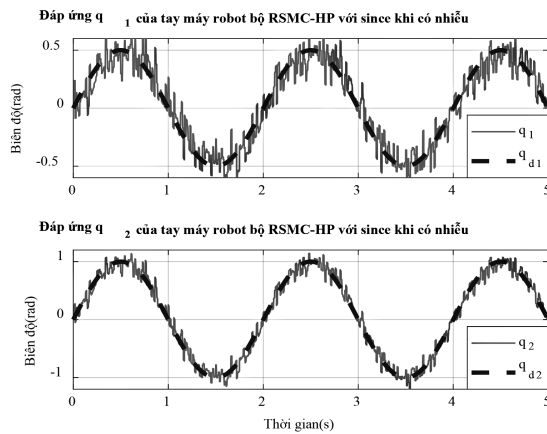
**Hình 7. Đáp ứng của thanh 1 và 2 với bộ RSMC-HP khi  $q_{d1}=0,5\sin(\pi t)$  và  $q_{d2}=\sin(\pi t)$**



**Hình 8. Đáp ứng vận tốc bám của thanh 1 và 2 với bộ RSMC-HP khi  $q_{d1}=0,5\sin(\pi t)$  và  $q_{d2}=\sin(\pi t)$**



**Hình 9. Đáp ứng của thanh 1 và 2 với bộ RSMC-HP khi  $q_{d1}=0,5(\text{rad})$  và  $q_{d2}=0,5(\text{rad})$  trong trường hợp có nhiễu**



**Hình 10. Đáp ứng của thanh 1 và 2 với bộ RSMC-HP khi  $qd1=0,5\sin(\pi t)$  và  $qd2=\sin(\pi t)$  trong trường hợp có nhiễu**

Các kết quả đạt được đã chứng minh sự phù hợp, tính hiệu quả và bền vững của bộ điều khiển đề xuất áp dụng cho tay máy robot 2 bậc tự do.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển trượt bền vững với hiệu suất cao cho tay máy robot. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế

đảm bảo các vị trí thực tế của tay máy robot bám theo các vị trí cho trước. Hàm signum đã được thay thế bằng hàm hyperbolic tangent (hay còn gọi là hàm *tanh*). Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả và tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất với thời gian tăng đạt 0,4962(s), thời gian xác lập là 1,0483(s), sai số xác lập là 0(rad), độ vọt lố là 0(%), IAE là 0,1398, ISE là 0,0378 cho thanh 1 và tương ứng với thanh 2 là 0,5377(s), 1,3956(s), 0(rad), 0(%), 0,1395 và 0,0316. Ngoài ra, các kết quả đáp ứng thực tế của tay máy robot trong trường hợp ngõ vào thay đổi hoặc nhiễu ngoài tác động ở ngõ ra của tay máy vẫn tiến về các vị trí mong muốn. Điều này đã thể hiện sự phù hợp, tính hiệu quả và bền vững của bộ điều khiển đề xuất áp dụng cho tay máy robot. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ áp dụng các kỹ thuật điều khiển thông minh hoặc giải thuật tối ưu cho robot này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] MĐ Hoàng, PD Thi, ND Huy, and NT Lâm, “Điều khiển ổn định cho Robot hai bậc tự do sử dụng mô hình mờ Takagi-Sugeno,” *Measurement, Control, and Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 65–72, 2022.
- [2] Q. Zhang, M. Mu, H. Ji, Q. Wang, and X. Wang, “An adaptive type-2 fuzzy sliding mode tracking controller for a robotic manipulator,” *era*, vol. 31, no. 7, pp. 3791–3813, 2023, doi: 10.3934/era.2023193.
- [3] Nguyễn Vinh Quan, “Mạng nơ-ron và điều khiển thích nghi cho robot hai bậc tự do,” *Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp Hồ Chí Minh*, vol. 16, pp. 73–79, 2020.
- [4] Võ Thu Hà, “Ứng Dụng Luật Điều Khiển Lực Theo Phương Pháp Điều Khiển Trở Kháng Tích Cực Kết Hợp Mạng Nơron Cho Hệ Chuyển Động Robot Almega 16,” *Tạp chí Khoa Học & Công Nghệ*, vol. 42, pp. 25–30, 2017.
- [5] Lê Anh Tuấn and Đỗ Đức Lưu, “Điều khiển Rô bốt kền tay đôi sử dụng kỹ thuật trượt SMC,” *Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*, vol. 50, pp. 1–10, 2017.
- [6] Phan Đình Hiếu, Đào Minh Tuấn, Lê Ngọc Duy, and Lê Văn Nghĩa, “Thiết kế bộ điều khiển trượt vị trí/lực cánh tay robot tương tác với môi trường làm việc,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, vol. 55, pp. 67–70, 2019.
- [7] Xinyu Shao, Zhen Liu, and Baoping Jiang, “Sliding-mode controller synthesis of

- robotic manipulator based on a new modified reaching law,” in *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2022, pp. 6362–6378. doi: 10.3934/mbe.2022298.
- [8] Fatma Massaoudi, Dorsaf Elleuch, and Tarak Damak, “Robust Control for a Two DOF Robot Manipulator,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2019, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1155/2019/3919864.
- [9] Sibbir Ahmed, Kshetrimayum Lochan, and Binoy Krishna Roy, “Fractional-Order Adaptive Sliding Mode Control for a Two-Link Flexible Manipulator,” in *Innovations in Infrastructure*, vol. 757, Dipankar Deb, Valentina E. Balas, and Rajeeb Dey, Eds., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 757, Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 33–53. doi: 10.1007/978-981-13-1966-2\_4.
- [10] Barış ÖZYER, “Adaptive fast sliding neural control for robot manipulator,” *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 28, no. 6, 2020, doi: 10.3906/elk-2001-129.
- [11] Ayman A Aly, “Fuzzy Disturbance Rejection Control of Two Link Robot Manipulator,” *Journal of Asian Scientific Research*, vol. 7, no. 7, pp. 288–296, 2017, doi: 10.18488/journal.2.2017.77.288.296.
- [12] Vu Thi Yen, Wang Yao Nan, Pham Van Cuong, Nguyen Xuan Quynh, and Vu Huu Thich, “Robust adaptive sliding mode control for industrial robot manipulator using fuzzy wavelet neural networks,” *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 2930–2941, 2017, doi: 10.1007/s12555-016-0371-5.
- [13] El-Hadi Guechi, Samir Bouzoualegh, Lotfi Messikh, and Saso Blazic, “Model predictive control of a two-link robot arm,” in *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)*, Hammamet: IEEE, Mar. 2018, pp. 409–414. doi: 10.1109/ASET.2018.8379891.
- [14] T. S. Lee, E. A. Alandoli, and V. Vijayakumar, “2-DOF robot modelling by SimMechanics and PD-FL integrated controller for position control and trajectory tracking,” *F1000Res*, vol. 10, pp. 1–16, 2021, doi: 10.12688/f1000research.72912.1.
- [15] Qiang Mi, Feng Jia, Yu Bai, and Gerard Edwards, “Comparison PID and PDF Control in 2 Degree of Freedom Robotic Manipulator,” *International Conference on Precision Machining, Non-Traditional Machining and Intelligent Manufacturing (PNTIM 2019)*, vol. 5, pp. 144–148, 2019.
- [16] B. Mahboub and D. Stephen, “A Two-Link Robot Manipulator: Simulation and Control Design,” *Int J Robot Eng*, vol. 5, no. 2, pp. 1–17, 2020, doi: 10.35840/2631-5106/4128.
- [17] Azzedine Khati, “Backstepping Control of Two Degrees of Freedom (2-DOF) Robot Manipulator,” *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 27–33, 2020.
- [18] Bekir Cirak, “Modeling and Controlling of a 2 DOF Robot Manipulator with Artificial Neural Networks,” *Journal of Modern Technology and Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 258–264, 2018.
- [19] Jinkun Liu and Xinhua Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Springer, 2012.