

ADAPTIVE SYNCHRONOUS SLIDING MODE CONTROLLER FOR ROBOT MANIPULATORS

Nguyen Duc Dien^{1*}, Lai Khắc Lai², Vu Viet Thong¹

¹University of Economics-Technology for Industry, ²TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 02/01/2024 Revised: 29/01/2024 Published: 31/01/2024	Improving the quality of trajectory tracking for robot manipulators is always an attractive topic in the research community. This is a challenging problem because robot manipulators are complex nonlinear systems and are often subject to fluctuations in loads and external disturbances. This paper proposes an adaptive synchronous sliding control scheme to improve trajectory tracking performance for robot manipulators. Firstly, the synchronous tracking errors, cross synchronization errors, and sliding surfaces are defined, and the synchronization tracking error dynamics are constructed. Secondly, a control law is proposed, in which the unknown component of the model is approximated online by a neural network, and the parameters of the switching component are determined by fuzzy logic based on the values of synchronous tracking errors. The proposed controller ensures synchronous tracking and approximation errors are UUB (Ultimately Uniformly Bounded). Finally, the performance of the proposed algorithm is verified by comparative simulation on Matlab-Simulink. The simulation results show the effectiveness of the proposed controller with small synchronous tracking errors about 10^{-6} , fast convergence about 1s, and significantly reduced chattering phenomenon.
KEYWORDS	
Robot manipulators	
Synchronization tracking error	
Sliding mode control	
Adaptive control	
Neural networks	

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT ĐỒNG BỘ THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT

Nguyễn Đức Điển^{1*}, Lại Khắc Lai², Vũ Việt Thông¹

¹Trường Đại học Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp, ²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 02/01/2024 Ngày hoàn thiện: 29/01/2024 Ngày đăng: 31/01/2024	Vấn đề nghiên cứu nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho tay máy robot luôn là chủ đề hấp dẫn của cộng đồng nghiên cứu. Đây là một vấn đề thách thức, bởi tay máy robot là đối tượng phi tuyến phức tạp và thường chịu sự biến động của tải trọng, nhiễu bên ngoài tác động. Bài báo đề xuất một sơ đồ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi để nâng cao hiệu suất bám quỹ đạo cho tay máy robot. Đầu tiên, bài báo xác định các sai số bám đồng bộ, sai số đồng bộ chéo, mặt trượt, và xây dựng động lực học sai số bám đồng bộ. Thứ hai, bài báo đề xuất bộ điều khiển trượt thích nghi, trong đó mạng nơron dùng để xấp xỉ trực tuyến các thành phần chưa biết của mô hình, logic mờ dùng để xác định tham số của thành phần chuyển mạch dựa trên các giá trị của sai số bám đồng bộ. Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo các sai số bám đồng bộ và sai số xấp xỉ là UUB (Ultimately Uniformly Bounded). Cuối cùng, hiệu suất của thuật toán đề xuất được xác minh bởi mô phỏng so sánh trên Matlab-Simulink. Thông qua các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với các sai số bám đồng bộ có giá trị nhỏ khoảng 10^{-6} , tốc độ hội tụ nhanh khoảng 1s, và hiện tượng chattering giảm đáng kể.
TỪ KHÓA	
Tay máy robot	
Sai số bám đồng bộ	
Điều khiển trượt	
Điều khiển thích nghi	
Mạng nơron	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9522>

* Corresponding author. Email: nddien@uneti.edu.vn

1. Giới thiệu

Hiện nay robot đã trở thành thiết bị quan trọng trong dây chuyền sản xuất, lĩnh vực y tế, vận chuyển. Vì vậy, vấn đề nghiên cứu điều khiển robot luôn là chủ đề hấp dẫn của cộng đồng nghiên cứu [1]. Đây là một vấn đề thách thức, bởi robot là đối tượng phi tuyến phức tạp và thường chịu sự biến động của tải trọng, nhiễu bên ngoài tác động. Các phương pháp điều khiển truyền thống là PD (Proportional Derivative) bù trọng trường, bộ điều khiển trượt, và bộ điều khiển cuộn chiều [2], trong đó bộ điều khiển trượt đã được sử dụng phổ biến bởi tính năng linh hoạt và hiệu quả. Bộ điều khiển trượt đã được phát triển theo nhiều phiên bản khác nhau như: bộ điều khiển trượt đầu cuối, bộ điều khiển trượt phân số, bộ điều khiển trượt đầu cuối tác động nhanh [3]. Nhược điểm của phương pháp điều khiển trượt truyền thống là yêu cầu mô hình động lực học chính xác. Vấn đề xác định mô hình động lực học chính xác của robot là khó khăn, bởi các tham số mô hình bị thay đổi trong quá trình làm việc. Trong [4], bộ điều khiển trượt thích nghi đã được phát triển dựa trên kỹ thuật cuộn chiều để giảm sự phụ thuộc mô hình toán học của robot. Trong [5], bộ điều khiển thích nghi bền vững được giới thiệu dựa trên sự kết hợp của điều khiển trượt tích phân, mờ thích nghi, và bộ quan sát nhiễu. Trong [6], bộ điều khiển trượt thích nghi dựa trên mạng nơron (Neural Network - NN) đã được đề xuất cho robot khi tham số mô hình không chắc chắn và nhiễu loạn. Ngoài ra, bộ điều khiển thích nghi bền vững dựa trên mô hình mờ-nơron đã được giới thiệu trong [7]. Tuy nhiên, các bộ điều khiển đã đề xuất trên chỉ xem xét sai số của từng khớp. Sai số của quỹ đạo chuyển động bị ảnh hưởng bởi sai số vị trí của các khớp. Do đó, sai số vị trí các khớp cần được điều khiển đồng bộ để tăng độ chính xác cho quỹ đạo chuyển động robot [8]. Bởi thành phần chuyển mạch của bộ điều khiển trượt, nên bộ điều khiển gây ra hiện tượng chattering quanh mặt trượt, vấn đề này gây ảnh hưởng lớn đến cơ cấu chấp hành. Trong [9], bộ điều khiển trượt mờ tự điều chỉnh đã được thiết kế cho robot với các tham số mô hình không chắc chắn và nhiễu loạn bên ngoài, trong đó hiện tượng chattering được giải quyết bằng cách sử dụng hàm bão hòa thay vì hàm dấu trong thành phần chuyển mạch của bộ điều khiển trượt. Tuy nhiên, bộ điều khiển này đã không xem xét tới sai số đồng bộ. Trong [10], bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi cho robot song song đã được đề xuất, trong đó các thành phần không chắc chắn và thành phần chuyển mạch của bộ điều khiển được xấp xỉ bằng logic mờ. Bộ điều khiển trượt thích nghi kết hợp thuật toán lọc thông thấp được sử dụng trong [11] để loại bỏ hiện tượng chattering, tuy nhiên thuật toán chỉ áp dụng cho một lớp đối tượng phi tuyến.

Từ những phân tích trên, tác giả đề xuất bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi cho robot trên cơ sở NN và logic mờ. Những đóng góp chính của bài báo được tóm tắt như sau: Khác với [5] - [7], bộ điều khiển đề xuất xem xét sai số đồng bộ để tăng độ chính xác cho quỹ đạo chuyển động robot. Không giống [10], tác giả sử dụng NN để xấp xỉ thành phần phi tuyến chưa biết hoàn toàn. Bộ điều khiển đề xuất sử dụng bộ logic mờ để giảm đáng kể hiện tượng chattering.

Tiếp theo cấu trúc bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi cho tay máy robot. Phần 3 đưa ra các kết quả mô phỏng và đánh giá kết quả mô phỏng. Phần 4 đưa ra kết luận của bài báo.

2. Bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi cho tay máy robot

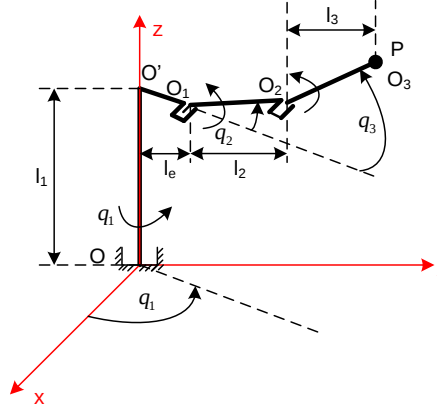
2.1. Mô hình động lực học tay máy robot

Xét một tay máy robot Scorbob-ER [12] được minh họa như Hình 1, trong đó $l_1 = 0,35m$, $l_e = 0,025m$, $l_2 = 0,222m$, $l_3 = 0,222m$. Phương trình động lực học của tay máy robot Scorbob-ER có dạng như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d, \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, và $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ lần lượt là vị trí, vận tốc, và gia tốc góc của các biến khớp, ma trận quán tính $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là đối xứng, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận Coriolis và ly tâm,

$\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vector lực trọng trường, $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là thành phần ma sát, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vector mô-men điều khiển, $\boldsymbol{\tau}_d \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vector nhiễu ngoài.



Hình 1. Sơ đồ Scorbot-ER

Ma trận của các thành phần trong phương trình động lực học là

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_6 & l_2 \sigma_2 \cos(q_3 - q_2) \\ 0 & l_2 \sigma_2 \cos(q_3 - q_2) & \sigma_7 \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} a\dot{q}_2 + b\dot{q}_3 & a\dot{q}_1 & b\dot{q}_1 \\ -a\dot{q}_1 & 0 & -c\dot{q}_3 \\ -b\dot{q}_1 & c\dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \sigma_8 \dot{q}_1 + \sigma_{11} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \sigma_9 \dot{q}_2 + \sigma_{12} \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \\ \sigma_{10} \dot{q}_3 + \sigma_{13} \operatorname{sgn}(\dot{q}_3) \end{bmatrix}, \mathbf{G}(\mathbf{q}) = [0 \quad \sigma_1 g \cos q_2 \quad \sigma_2 g \cos q_3]^T,$$

trong đó, $M_{11} = 2\sigma_1 l_e \cos q_2 + 2\sigma_2 (l_e + l_2 \cos q_2) \cos q_3 + 0,5\sigma_3 \cos(2q_2) + 0,5\sigma_4 \cos(2q_3) + \sigma_5$,
 $a = -(\sigma_1 l_e \sin q_2 + \sigma_2 l_2 \sin q_2 \cos q_3 + 0,5\sigma_3 \sin(2q_2))$, $b = -(\sigma_2 (l_e + l_2 \cos q_2) \sin q_3 + 0,5\sigma_4 \sin(2q_3))$,
 $c = l_2 \sigma_2 \sin(q_3 - q_2)$, $\sigma_1 = \sigma_4 = \sigma_7 = 0,006$, $\sigma_2 = 0,002$, $\sigma_3 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0,011$, $\sigma_8 = \sigma_9 = \sigma_{10} = 0,52$,
 $\sigma_{11} = 0,019$, $\sigma_{12} = \sigma_{13} = 0,018$.

Tính chất 1: $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$, và $\boldsymbol{\tau}_d$ là bị chặn, tức là $\|\mathbf{M}(\mathbf{q})\| \leq M_m$, $\|\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\| \leq C_m$, $\|\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})\| \leq F_m$, $\|\mathbf{G}(\mathbf{q})\| \leq G_m$, với M_m , C_m , F_m , G_m , τ_m là các hằng số dương.

Tính chất 2: $\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận đối xứng lệch, tức là $\mathbf{x}^T (\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \mathbf{x} = 0$, $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi

2.2.1. Động lực học sai số bám đồng bộ

Định nghĩa các sai số bám vị trí của các khớp là $\mathbf{e}(\mathbf{t}) = \mathbf{q}_d(\mathbf{t}) - \mathbf{q}(\mathbf{t})$. Xác định sai số đồng bộ là $\bar{\mathbf{e}} = [e_1 - e_2, e_2 - e_3, \dots, e_n - e_1]^T$. Mục tiêu điều khiển không những đảm bảo $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(\mathbf{t}) \rightarrow 0$, mà còn đồng thời đảm bảo $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{e}}(\mathbf{t}) \rightarrow 0$. Để điều tiết cùng lúc sai số bám vị trí và sai số bám đồng bộ, sai số đồng bộ chéo được đưa ra là

$$\mathbf{z} = \mathbf{e} + \Lambda_1 \bar{\mathbf{e}}, \quad (3)$$

trong đó Λ_1 là ma trận xác định dương. Mặt trượt được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda_2 \mathbf{z}, \quad (4)$$

trong đó $\Lambda_2 = \Lambda_2^T > 0$. Đạo hàm hai vế của (4) và thực hiện một số phép biến đổi, ta có được kết quả như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{s}} &= \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda_2 \dot{\mathbf{z}}) - \mathbf{C}\mathbf{s} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda_2 \mathbf{z}) + \mathbf{G} + \mathbf{F} + \boldsymbol{\tau}_d - \boldsymbol{\tau} \\ &= -\mathbf{C}\mathbf{s} - \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\tau}_d, \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó $\boldsymbol{\psi} = \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda_2 \dot{\mathbf{z}}) + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda_2 \mathbf{z}) + \mathbf{G} + \mathbf{F}$.

2.2.2. Xấp xỉ hàm dùng mạng RBF

Bởi $\boldsymbol{\psi}$ trong (5) là chưa biết, trong bài báo này tác giả sử dụng mạng RBF (Radial Basis Function) với một lớp ẩn để xấp xỉ hàm $\boldsymbol{\psi}$. Mạng RBF được mô tả như sau:

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (6)$$

trong đó $\mathbf{x} = [z^T, \dot{z}^T, q_d^T, \dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T]^T$ là các đầu vào, $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ là hàm tác động được chọn là $\varphi_j = \exp\left(-\|x - c_i\|^2 / b_j^2\right)$, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, \dots, m$, m là số nơron lớp ẩn, c_i là tâm của hàm tác động, b_j là độ phân tán của hàm tác động, $\boldsymbol{\varepsilon}$ là sai số xấp xỉ của mạng nơron, $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_m]^T$ là vector trọng số lý tưởng thỏa mãn $\|\mathbf{W}\|_F \leq W_m$ ($\|\cdot\|_F$ là chuẩn Frobenius). Bởi trọng số $\mathbf{W}$ là chưa biết, xấp xỉ hàm $\boldsymbol{\psi}$ được đưa ra như sau:

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), \quad (7)$$

trong đó $\hat{\mathbf{W}}$ là trọng số xấp xỉ. Định nghĩa sai số xấp xỉ là $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W} - \hat{\mathbf{W}}$. Từ (6) và (7), ta có

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}) - \hat{\boldsymbol{\psi}}(\mathbf{x}) = \tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (8)$$

2.2.3. Thiết kế luật điều khiển

Đối với mục tiêu điều khiển cho hệ thống (1), luật điều khiển được đề xuất như sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\psi}} + \mathbf{K}\mathbf{s} + \beta \text{sign}(\mathbf{s}), \quad (9)$$

trong đó $\mathbf{K} = \mathbf{K}^T > 0$, $\beta = \varepsilon_m + b_d$, $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \varepsilon_m$, $\|\boldsymbol{\tau}_d\| \leq b_d$. Thay (9) vào (5), động lực học sai số tám trở thành

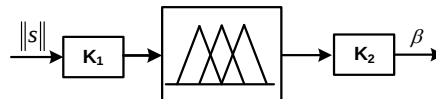
$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} = (-\mathbf{K} + \mathbf{C})\mathbf{s} + \tilde{\mathbf{W}}\boldsymbol{\varphi} + (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d - \beta \text{sign}(\mathbf{s})). \quad (10)$$

Luật điều chỉnh tham số của mạng RBF được thiết kế là

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}} = \mathbf{F}\boldsymbol{\varphi}\mathbf{s}^T - k\mathbf{F}\|\mathbf{s}\|\hat{\mathbf{W}}, \quad (11)$$

với $\mathbf{F} = \mathbf{F}^T > 0$, $k > 0$.

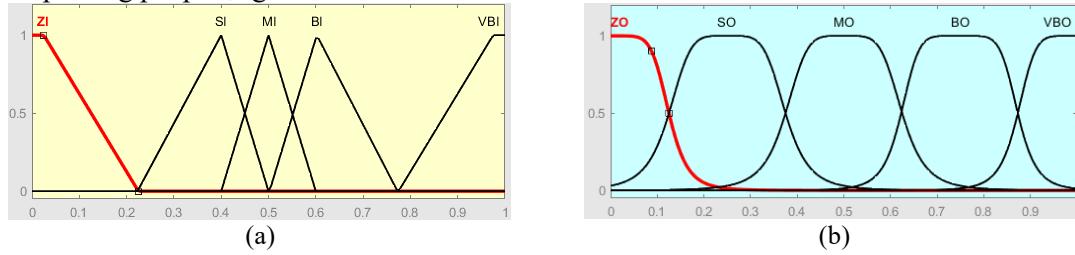
Trong luật điều khiển (9), hiện tượng chattering bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi tham số β . Nếu tham số này nhỏ thì thời gian đáp ứng chậm và hiện tượng chattering giảm, và ngược lại. Trong bài báo này, tác giả sử dụng logic mờ để tạo ra luật thay đổi cho tham số β theo $\|\mathbf{s}\|$. Bộ điều khiển mờ có cấu trúc như Hình 2, trong đó các hệ số K_1 , K_2 là tiền xử lý và hậu xử lý dùng để chuẩn hóa giá trị đầu vào và đầu ra. Các tham số K_1 , K_2 cần được lựa chọn phù hợp để xác định vùng giá trị đầu vào và đầu ra bộ điều khiển mờ hợp lý.



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển mờ

Hàm liên thuộc của đầu vào, đầu ra minh họa như Hình 3, trong đó các biến ngôn ngữ được ký hiệu như sau: ZI (Zero Input) là đầu vào bằng 0, SI (Small Input) là đầu vào nhỏ, MI (Medium Input) là đầu vào trung bình, BI (Big Input) là đầu vào lớn, VBI (Very Big Input) là đầu vào rất lớn, ZO (Zero Output) là đầu ra bằng 0, SO (Small Output) là đầu ra nhỏ, MO (Medium Output) là đầu ra trung bình, BO (Big Output) là đầu ra lớn, VBO (Very Big Output) là đầu ra rất lớn.

Luật điều khiển minh họa như Bảng 1, phương pháp suy diễn là max-min, và phương pháp giải mờ là phương pháp trọng tâm.



Hình 3. Hàm liên thuộc: (a) Đầu vào, (b) Đầu ra

Bảng 1. Luật điều khiển mờ

Luật	$\ s\ $	β
1	ZI	ZO
2	SI	SO
3	MI	MO
4	BI	BO
5	VBI	VBO

2.2.4. Phân tích tính ổn định và hội tụ

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống, hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$L = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M} \mathbf{s} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{F}^{-1} \tilde{\mathbf{W}}). \quad (12)$$

Đạo hàm L ta thu được kết quả là

$$\dot{L} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{s} + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{F}^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}). \quad (13)$$

Thay (10), (11) vào (13), ta được

$$\dot{L} = -\mathbf{s}^T \mathbf{K} \mathbf{s} + k \|\mathbf{s}\| \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T (\mathbf{W}_m - \tilde{\mathbf{W}}_m)) + (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d - \beta \text{sign}(\mathbf{s})). \quad (14)$$

Bởi vì $\text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T (\mathbf{W} - \tilde{\mathbf{W}})) = (\tilde{\mathbf{W}}, \mathbf{W})_F - \|\tilde{\mathbf{W}}\|_F^2 \leq \|\tilde{\mathbf{W}}\|_F \|\mathbf{W}\|_F - \|\tilde{\mathbf{W}}\|_F^2$, ta có kết quả

$$\begin{aligned} \dot{L} &\leq -K_{\min} \|\mathbf{s}\|^2 + k \|\mathbf{s}\| \|\tilde{\mathbf{W}}\|_F (W_m - \|\tilde{\mathbf{W}}\|_F) \\ &= -\|\mathbf{s}\| (\lambda_{\min} \|\mathbf{s}\| + k (\|\tilde{\mathbf{W}}\|_F - W_m/2)^2 - k W_m^2/4) \end{aligned} \quad (15)$$

trong đó $\lambda_{\min}$ là giá trị riêng nhỏ nhất của ma trận $\mathbf{K}$. Do đó, $\dot{L} < 0$ khi và chỉ khi

$$\|\mathbf{s}\| > \frac{k_m W_m^2}{4K_{\min}} = \delta_1, \quad (16)$$

hoặc

$$\|\tilde{\mathbf{W}}\|_F > W_m = \delta_2. \quad (17)$$

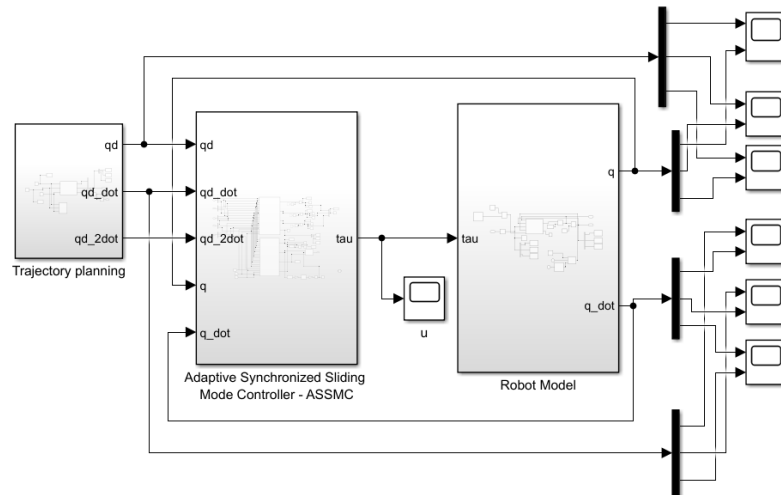
Từ (16) và (17), ta có thể thấy rằng nếu $\|\mathbf{s}\|$ hoặc $\|\tilde{\mathbf{W}}\|_F$ vượt quá vùng ổn định, được trình bày dưới dạng tập compact δ_1 hoặc δ_2 , thì $\dot{L} < 0$, tức là các sai số bám đồng bộ hoặc các sai số xấp xỉ được kéo vào vùng ổn định. Như vậy các sai số bám đồng bộ và các sai số xấp xỉ là UUB.

3. Kết quả mô phỏng và bàn luận

Trong phần này, hiệu suất của bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi (Adaptive Synchronized Sliding Mode Controller - ASSMC) đã đề xuất được xác minh qua mô phỏng và so sánh với bộ điều khiển trượt thích nghi (Adaptive Sliding Mode Controller - ASMC) trong [13]. Sơ đồ khối

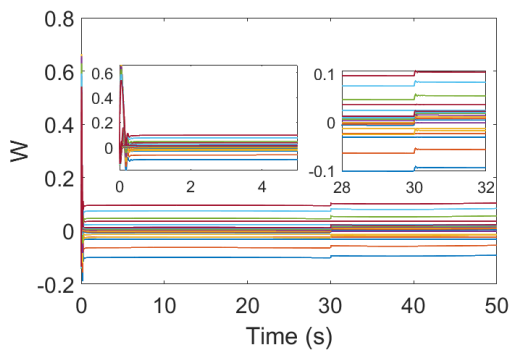
mô phỏng được xây dựng trên Matlab/ Simulink như Hình 4. Các giá trị ban đầu của robot được chọn là $\mathbf{q}(0) = [0,01 \ 0,01 \ 0,01]^T$, $\dot{\mathbf{q}}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$. Quỹ đạo vị trí mong muốn của các khớp được xác định từ quỹ đạo của $\mathbf{P}_d$ thông qua các phương trình động học ngược, trong đó quỹ đạo mong muốn của $\mathbf{P}_d$ được cho như sau:

$$\mathbf{P}_d = \begin{bmatrix} x_{Pd} \\ y_{Pd} \\ z_{Pd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,36 + 0,1\sin(0,04\pi) \\ 0,1\cos(0,04\pi) \\ 0,4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

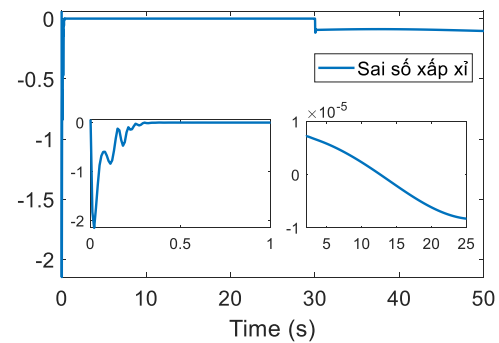


Hình 4. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt đồng bộ thích nghi

Các tham số bộ điều khiển đề xuất được chọn như sau: $\Lambda_1 = \text{diag}[1,1,1]$, $\Lambda_2 = \text{diag}[5,5,5]$, $\mathbf{K} = \text{diag}[25,25,25]$, $k = 0,01$, $K_1 = 1$, $K_2 = 0,5$, $b_i = 10$, $\mathbf{c}_i = [-1,5;-1,0;-0,5;0;0,5;1,0;1,5]$, số neuron lớp ẩn là 7, trọng số cho 3 khớp là 21, τ_d có giá trị ngẫu nhiên trong khoảng $[-0,5 \ 0,5]^T$ Nm. Các tham số của ASSMC được chọn giống như ASSMC. Thực hiện mô phỏng trong thời gian 50s, với thời gian lấy mẫu là 0,01s. Tại thời điểm 30s, thực hiện thay đổi tải gấp đôi ban đầu.

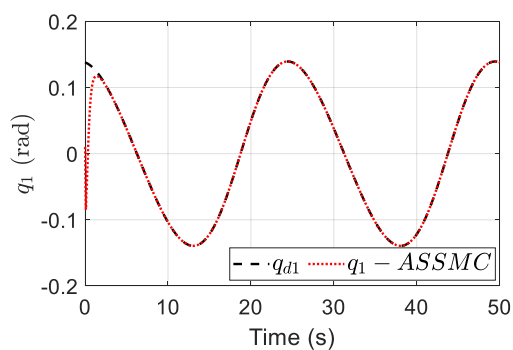
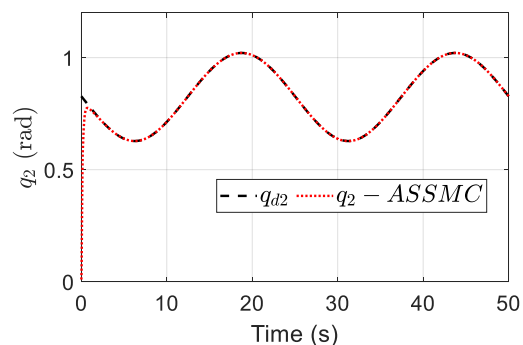
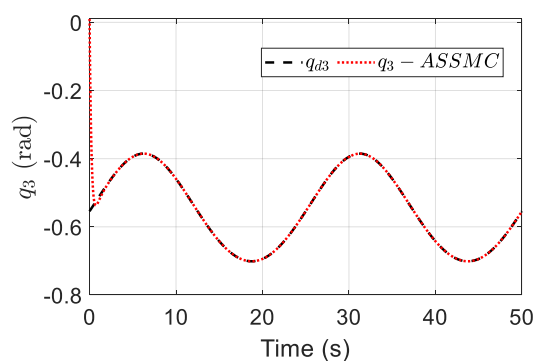
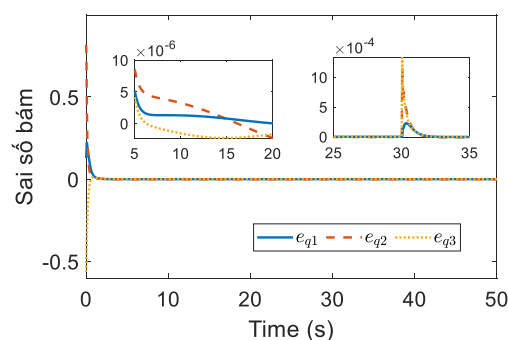


Hình 5. Sự hội tụ của trọng số

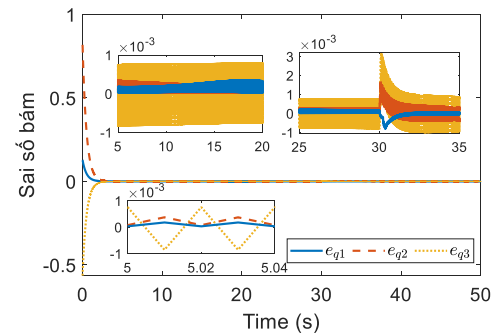


Hình 6. Sai số xấp xỉ hàm

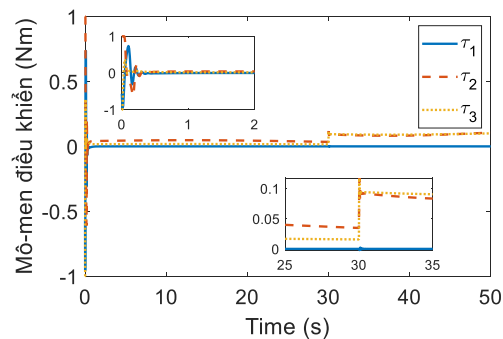
Kết quả quá trình cập nhật trọng số của ASSMC minh họa như Hình 5 và kết quả xấp xỉ hàm như Hình 6. Chúng cho thấy rằng, trọng số hội tụ nhanh và sai số xấp xỉ khoảng 10^{-5} . Hình 7, 8, 9 thể hiện quỹ đạo bám tốt của vị trí các khớp. Hình 10 và Hình 11 thể hiện sai số bám của các bộ điều khiển, chúng cho thấy rằng hiệu suất của ASSMC là tốt hơn ASMC. Tại thời điểm thay đổi tải, các giá trị trọng số thay đổi (Hình 5) để mô-men điều khiển thay đổi đủ lớn (Hình 10) để đảm bảo hiệu suất sai số bám.

Hình 7. Quỹ đạo vị trí q_1 của ASSMCHình 8. Quỹ đạo vị trí q_2 của ASSMCHình 9. Quỹ đạo vị trí q_3 của ASSMC

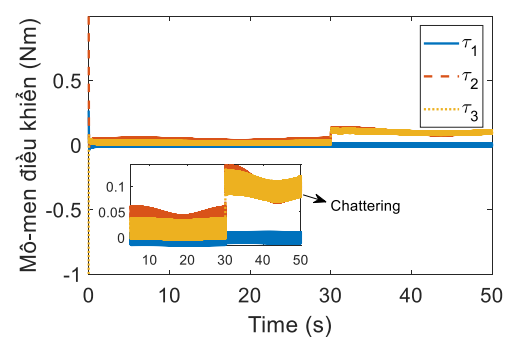
Hình 10. Sai số bám vị trí của ASSMC



Hình 11. Sai số bám vị trí của ASMC



Hình 12. Mô-men điều khiển của ASSMC



Hình 13. Mô-men điều khiển của ASMC

Hình 11 cho thấy các sai số bám của ASMC dao động mạnh khoảng 50Hz trong phạm vi từ -1.10^{-3} đến 1.10^{-3} . Hình 13 thể hiện rằng mô-men điều khiển ASMC dao động mạnh trong phạm vi

vi khoảng từ $-0,2$ đến $0,4$ Nm. So sánh Hình 10 với Hình 11 và so sánh Hình 12 với Hình 13, ta có thể thấy rằng hiện tượng dao động của các sai số bám và mô-men điều khiển được cải thiện. Qua đó, ta có thể kết luận được rằng với ASSMC hiện tượng chattering được giảm đáng kể so với ASMC, với ASMC có hiện tượng dao động khoảng 50Hz, trong khi với ASSMC hiện tượng dao động gần như được loại bỏ.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp thiết kế thuật toán điều khiển trượt đồng bộ thích nghi cho tay máy robot, trong đó các thành phần chưa biết của mô hình được xấp xỉ trực tuyến bởi NN, hiện tượng chattering được giảm đáng kể bởi logic mờ. Các sai số bám đồng bộ và sai số xấp xỉ của NN là ổn định UUB. Thông qua các kết quả mô phỏng so sánh đã cho thấy hiệu quả của thuật toán đề xuất. Các công việc tiếp theo của tác giả là kiểm chứng thuật toán qua thực nghiệm và phát triển thuật toán trong không gian thao tác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. He, Z. Li, and C. P. Chen, "A survey of human-centered intelligent robots: issues and challenges," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 4, pp. 602-609, 2017.
- [2] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control Theory and Practice*. CRC Press, 2003.
- [3] J. Liu and X. Wang, *Adaptive sliding mode control for mechanical systems*. Springer, 2011.
- [4] Y. Wang, Z. Zhang, C. Li, and M. Buss, "Adaptive incremental sliding mode control for a robot manipulator," *Mechatronics*, vol. 82, p. 102717, 2022.
- [5] M. Van and S. S. Ge, "Adaptive fuzzy integral sliding-mode control for robust fault-tolerant control of robot manipulators with disturbance observer," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 1284-1296, 2020.
- [6] V. T. Yen, W. Y. Nan, and P. V. Cuong, "Robust adaptive sliding mode neural networks control for industrial robot manipulators," *International Journal of Control, Automation Systems*, vol. 17, pp. 783-792, 2019.
- [7] N. X. Quynh, W. Y. Nan, and V. T. Yen, "Design of a robust adaptive sliding mode control using recurrent fuzzy wavelet functional link neural networks for industrial robot manipulator with dead zone," *Intelligent Service Robotics*, vol. 13, pp. 219-233, 2020.
- [8] Q. V. Doan, T. D. Le, Q. D. Le, and H.-J. Kang, "A neural network-based synchronized computed torque controller for three degree-of-freedom planar parallel manipulators with uncertainties compensation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 2, 2018, Art. no. 1729881418767307.
- [9] A. Ashagrie, A. O. Salau, and T. Weldchekos, "Modeling and control of a 3-DOF articulated robotic manipulator using self-tuning fuzzy sliding mode controller," *Cogent Engineering*, vol. 8, no. 1, 2021, Art. no. 1950105.
- [10] T. D. Le and Q. V. Doan, "Fuzzy adaptive synchronized sliding mode control of parallel manipulators," in *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, 2018, pp. 102-107.
- [11] K. Shao, J. Zheng, C. Yang, F. Xu, X. Wang, and X. Li, "Chattering-free adaptive sliding-mode control of nonlinear systems with unknown disturbances," *Computers Electrical Engineering*, vol. 96, 2021, Art. no. 107538.
- [12] M. Szuster and P. Gierlak, "Approximate dynamic programming in tracking control of a robotic manipulator," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 1, 2016, Art. no. 16.
- [13] J. Liu, *Intelligent Control Design and MATLAB Simulation*. Springer, 2018.