

ỨNG DỤNG HỆ THỐNG HỌC RỘNG TỰ SẮP XẾP TRONG ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY HAI BẬC TỰ DO

APPLICATION OF SELF-ORGANIZING WIDE LEARNING SYSTEM FOR TWO LINK MANIPULATOR

Phạm Đức Hùng^{1,*}, Trần Đình Hạnh^{1,2},
Đỗ Văn Tân¹, Phan Đình Hiếu³, Phạm Ngọc Thắng¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.070>

TÓM TẮT

Bài báo này nhóm tác giả giới thiệu một cấu trúc điều khiển thông minh dành cho các hệ phi tuyến, dựa trên sự kết hợp giữa điều khiển chế độ trượt và mạng học rộng (wide Learning System - BLS) với thiết kế hồi tiếp hai vòng lặp. Điểm nổi bật của BLS là khả năng tự tổ chức (self-organizing - SO), cho phép mạng tự động điều chỉnh kích thước để phù hợp với yêu cầu cụ thể. Phương pháp SO sử dụng hai ngưỡng động để tự động quyết định việc giữ lại, loại bỏ hoặc bổ sung nơ-ron, qua đó tối ưu hóa tài nguyên tính toán và nâng cao hiệu quả vận hành. Thiết kế hồi tiếp hai vòng lặp cải thiện đáng kể động học của mạng, đồng thời đảm bảo tính ổn định của hệ thống nhờ hàm Lyapunov. Để kiểm chứng hiệu quả và độ ổn định, nhóm nghiên cứu đã mô phỏng ứng dụng mạng học rộng trong bài toán điều khiển giám sát cánh tay robot hai bậc tự do trên nền tảng Matlab-Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống không chỉ đảm bảo tính ổn định mà còn đạt hiệu suất vượt trội trong điều khiển giám sát. Thành công này mở ra nhiều hướng nghiên cứu tiềm năng trong lĩnh vực điều khiển thông minh và ứng dụng thực tế.

Từ khóa: Mạng tự tổ chức, hệ thống học rộng, wide learning system (WLS), robot hai khớp.

ABSTRACT

In this paper, the authors present an intelligent control structure for nonlinear systems based on the combination of sliding mode control and a broad learning system (BLS) with a two-loop feedback design. The main feature of BLS is its self-organizing (SO) capability, which allows the network to adapt its size to the requirements automatically. The SO method uses two dynamic thresholds to automatically decide whether to keep, remove, or add neurons, optimizing computing resources and improving operational efficiency. The double feedback loop design significantly improves the network dynamics while ensuring the system's stability thanks to the Lyapunov function. To verify the effectiveness and stability, the authors simulated the application of the wide learning network to monitor and control a robot arm with two degrees of freedom on the Matlab-Simulink software platform. The simulation results show that the system ensures stability and performs well in monitoring control. Based on this result, many potential research directions open up in the field of intelligent control and practical applications.

Keywords: Self organizing mechanism, wide learning system (WLS), Two-link robot arm.

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

²Khoa Cơ điện, Trường Đại học Công nghiệp Dệt may Hà Nội

³Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: phandinhhiu@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/12/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 04/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, có rất nhiều nghiên cứu ứng dụng các phương pháp điều khiển để điều khiển các hệ thống phi tuyến không chắc chắn [1-2]; tuy nhiên, việc thiết kế một

bộ điều khiển thông minh hiệu quả với hiệu suất điều khiển xuất sắc vẫn là một thách thức. Muốn chống lại phi tuyến và sự không chắc chắn là yếu tố then chốt trong việc giải quyết thách thức này. Nhiều nghiên cứu đã đề

xuất sử dụng thuật toán điều khiển tối ưu như là phương pháp chính để điều khiển các hệ thống không chắc chắn [3-5].

Nói đến điều khiển hệ phi tuyến ta phải nhắc đến phương pháp điều khiển trượt (SMC) [5]. SMC có thể chuyển các hệ thống bậc cao thành các hệ thống bậc thấp và SMC không nhạy cảm với sự thay đổi tham số, có khả năng phản ứng nhanh và có thể kìm hãm các nhiễu bên ngoài [6]. Tuy nhiên, các bộ điều khiển SMC hiện tại thường gặp phải hai thách thức: (1) các bộ điều khiển tiêu tốn quá nhiều tài nguyên tính toán, (2) độ chính xác của các bộ điều khiển không đủ cao và đặc tính phản ứng động của chúng không đủ tốt. Đối với thách thức đầu tiên, một cấu trúc tự tổ chức phải được áp dụng để sử dụng tài nguyên tính toán một cách hiệu quả và linh hoạt. Do đó, chúng ta thấy rằng kỹ thuật Ưu tiên thứ tự dựa trên sự tương tự với giải pháp lý tưởng (TOPSIS), lần đầu tiên được đề xuất trong [4], đã được áp dụng trong nhiều mạng động [7], các kết quả cho thấy rằng TOPSIS có thể sử dụng thông tin chứa trong dữ liệu đầu vào để xếp hạng và chọn các nơ-ron ứng viên để xây dựng các cấu trúc tự tổ chức [4, 6, 7].

Đối với thách thức thứ hai, mạng Hệ thống Học Mở Rộng (WLS) [4], có thể mở rộng theo chiều rộng, từ đó cung cấp một cơ chế phản hồi nhanh hơn với độ chính xác cao hơn so với các mạng nơ-ron phổ biến khác [5, 8-11].

Dựa trên các cân nhắc trên, chúng tôi đề xuất một bộ điều khiển SMC dựa trên mạng WLS tự tổ chức, trong đó phương pháp TOPSIS được sử dụng để xây dựng cấu trúc tự tổ chức nhằm tận dụng hiệu quả tài nguyên tính toán [6]. Hai ngưỡng động (*dynamic threshold*): một ngưỡng xác định xem có giữ lại hay loại bỏ các nơ-ron đặc trưng hiện có và ngưỡng còn lại tạo ra các nơ-ron đặc trưng mới, được xác định tự động để xây dựng cấu trúc tự tổ chức [7].

Những đóng góp chính của bài báo gồm:

(1) Áp dụng phương pháp học mở rộng có sắp xếp (self-organizing) vào việc điều khiển hệ thống tay máy hai bậc tự do.

(2) Thành công trong việc mô phỏng bài toán nghiên cứu trên phần mềm Matlab-Simulink.

(3) Chứng minh rõ rệt sự vượt trội của phương pháp SO-WLS so với phương pháp WLS trong hiệu quả điều khiển.

2. ĐẶT VẤN ĐỀ VÀ HƯỚNG GIẢI QUYẾT

Công thức của một hệ thống phi tuyến có thể được trình bày như sau:

$$\mathbf{x}^{(n)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{l}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

Trong đó, $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ và $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ là các hàm bất định phi tuyến. $\mathbf{l}(\mathbf{x}) = [l_1, l_2, \dots, l_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ là độ bất định tập trung của hệ thống, $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ là tín hiệu điều khiển và $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \in \mathfrak{R}^m$. Trong trường hợp ta bỏ qua khả năng bất định cũng như các loại ảnh hưởng khác của nhiễu loạn bên ngoài thì hệ thống danh nghĩa của (1) có thể được biểu thị như sau:

$$\mathbf{x}^{(n)} = \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) + \mathbf{G}_0(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (2)$$

Trong đó, $\mathbf{G}_0 = \text{diag}(g_{01}, g_{02}, \dots, g_{0m})$ và $\mathbf{f}_0(\mathbf{x})$ là các phần danh nghĩa của $\mathbf{G}$ và $\mathbf{f}$ tương ứng không tính tổng quát. Giả sử rằng $g_{0i} \geq 0$ với $i = 1, \dots, m$ thống phi tuyến của (2) là có thể điều khiển được và $\mathbf{G}_0^{-1}$ tồn tại, sau đó hệ thống phi tuyến (1) có thể được mô tả như sau:

$$\mathbf{x}^{(n)} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{G}_0\mathbf{u} + \mathbf{l}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

Trong đó, độ không xác định tập hợp được xác định là $\mathbf{l}(\mathbf{x})$. Nhiệm vụ thiết kế một hệ thống điều khiển thích hợp để sao cho đầu ra $\mathbf{x}$ của hệ thống có thể theo dõi một vectơ quỹ đạo mong muốn $\mathbf{x}_r = [x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rm}]^T \in \mathfrak{R}^m$. Lỗi theo dõi có thể được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_r - \mathbf{x} \quad (4)$$

Nếu tất cả các yếu tố $\mathbf{f}_0$, $\mathbf{G}_0$ và $\mathbf{l}(\mathbf{x})$ đều được biết chính xác, thì sẽ có thể thiết kế bộ điều khiển lý tưởng như sau:

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{G}_0^{-1}(\mathbf{x}_r^{(n)} - \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) - \mathbf{l}(\mathbf{x}) + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{e}) \quad (5)$$

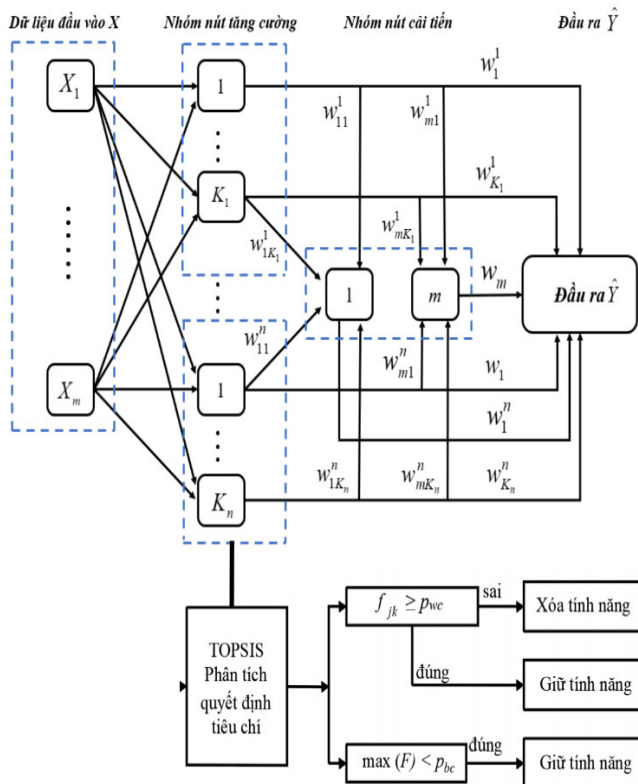
Trong đó, $\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{\Gamma}_m, \dots, \mathbf{\Gamma}_2, \mathbf{\Gamma}_1]^T$ là ma trận lợi ích phản hồi có các giá trị dương. Bằng cách thay thế bộ điều khiển lý tưởng vào phương trình (3), ta có thể thu được phương trình xác định sai số như sau:

$$\mathbf{e}^{(n)} + \mathbf{\Gamma}^T \times \mathbf{e} = 0 \quad (6)$$

Trong trường hợp $\mathbf{\Gamma}$ được chọn là một đa thức Hurwitz, điều này gợi ý rằng $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}\| = 0$. Tuy nhiên, $\mathbf{l}(\mathbf{x})$ không thể xác định trong các ứng dụng thực tế, vì vậy $\mathbf{u}^*$ không tính toán được chính xác. Do đó, một bộ điều khiển hệ thống học mở rộng tự sắp xếp Self-organizing wide learning system (SO-WLS) được đề xuất để xấp xỉ $\mathbf{u}^*$.

3. HỆ THỐNG HỌC MỞ RỘNG TỰ SẮP XẾP SELF-ORGANIZING WIDE LEARNING SYSTEM (SO-WLS)

Ở phần này, nhóm tác giả đưa phương pháp TOPSIS vào để xây dựng một WLS tự tổ chức, đáp ứng yêu cầu của các trạng thái điều khiển khác nhau và tiết kiệm tài nguyên tính toán. Cấu trúc của hệ thống tự sắp xếp học rộng được thể hiện như hình 1.



Hình 1. Cấu trúc của hệ thống tự sắp xếp học rộng self-organizing wide learning system (SO-WLS)

Lấy thông số ban đầu là các giá trị X cho hệ các vectơ đầu vào đầu tiên được đưa vào n ma trận các đặc điểm ngẫu nhiên trong “các nút đặc điểm” bằng n ánh xạ đặc điểm φ_i . Ma trận đặc điểm thứ i có dạng là:

$$Z_i = \varphi_i(XW_{fi} + \beta_{fi}), i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Trong đó, $X \in \mathbb{R}^{N \times M}$, $Y \in \mathbb{R}^{N \times C}$, N là số đầu vào, M là kích thước, C là kích thước của các đầu ra tương ứng, trọng số W_{f_i} và thuật ngữ sai lệch β_{f_i} là các ma trận được tạo ngẫu nhiên kết nối vectơ đầu vào với các nút đặc trưng. Chúng tôi biểu thị $Z_n \triangleq (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ là các đầu ra của n nhóm nút đặc trưng. Ma trận trọng số W_{f_i} sau đó được tinh chỉnh bởi một bộ mã hóa tự động để tạo ra các đặc trưng phù hợp hơn với Z_n .

Giả sử có m nhóm ánh xạ với các nút đặc trưng K_i trong nhóm thứ i và có một nhóm gồm m nút tăng cường, với mẫu đầu vào $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ và đầu ra mong muốn y, chúng ta ký hiệu $W_{fi} = (w_{f_{ki}}^i)M \times K_i$, $\beta_{fi} = (b_{fk}^i)1 \times K_i$, $W_e = (w_{jk}^i)(K_1 + K_2 + \dots + K_n) \times m$ và $\beta_e = (b_j)1 \times m$, trong đó $w_{f_{ki}}^i$ là trọng số kết nối đầu vào thứ với nút đặc trưng thứ k trong nhóm ánh xạ thứ i, b_{fk}^i là hạng tử thiên vị liên kết với nút đặc trưng thứ k trong nhóm ánh xạ thứ i, w_{jk}^i là

trọng số kết nối nút đặc trưng thứ k của nhóm ánh xạ thứ i với nút tăng cường thứ j và b_j là hạng tử thiên vị liên kết với nút tăng cường thứ j . Ta lấy ký hiệu đầu ra của hệ là $\hat{y}$.

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^m w_j \xi_j \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_j} w_k^i F_k^i + b_j \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_j} w_k^i F_k^i \quad (8)$$

Với đầu ra của nút thứ k trong nhóm ánh xạ thứ i và ξ_i hàm kích hoạt là $F_k^i \sum_{l=1}^M (w_{f_{kl}}^i x_l + b_{fk}^i)$ biểu thị đầu ra của nút tính năng thứ k trong nhóm ánh xạ thứ i và $\xi_j(\cdot)$ là hàm kích hoạt.

Lấy ma trận trọng số kết nối các đầu ra của các nút tính năng và các nút tăng cường với nơ-ron đầu ra (tức là các trọng số ở lớp trên cùng).

$$W = (w_1^1, \dots, w_{K_1}^1, \dots, w_n^1, \dots, w_{K_n}^n, w_1, \dots, w_m) \quad (9)$$

Trong đó, w_k^i là trọng số kết nối nút đặc trưng thứ k trong nhóm ảnh xạ thứ i với nơ-ron đầu ra và w_j là trọng số kết nối nút tăng cường thứ j^{th} với nơ-ron đầu ra.

Chúng tôi chỉ cập nhật W , W_e và β_e bằng cách giảm dần độ dốc để giữ lại các tính năng ngẫu nhiên được tạo ra bởi ánh xạ tính năng từ các đầu vào. Hàm lỗi giữa đầu ra thực tế y và đầu ra mô hình $\hat{y}$ được định nghĩa như sau:

$$E = \frac{1}{2}(\hat{y} - y)^2 \quad (10)$$

Đạo hàm các tham số W , W_e và β_e ta được:

$$\frac{\partial E}{\partial w_k^i} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial w_k^i} \cdot \frac{\partial E}{\partial \hat{y}} = F_k^i (\hat{y} - y) \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{w}_i} = \frac{\partial E}{\partial \hat{\mathbf{y}}} \cdot \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}}{\partial \mathbf{w}_i} = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \xi_j \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_j} \mathbf{w}_{jk}^i \mathbf{F}_k^i + \mathbf{b}_j \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \mathbf{w}_{jk}^i} &= \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \hat{\mathbf{y}}} \cdot \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}}{\partial \xi_j} \frac{\partial \xi_j}{\partial \mathbf{w}_{jk}^i} = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \mathbf{w}_j \mathbf{F}_k^i \dot{\xi}_j \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} \mathbf{w}_{jk}^i \mathbf{F}_k^i + \mathbf{b}_j \right) \\ &= (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \mathbf{w}_j \mathbf{F}_k^i (1 - \xi_j^2) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} \mathbf{w}_{jk}^i \mathbf{F}_k^i + \mathbf{b}_j \right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{b}_j} = \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}}{\partial \xi_j} \cdot \frac{\partial \xi_j}{\partial \mathbf{w}_{jk}^i} \cdot \frac{\partial E}{\partial \hat{\mathbf{y}}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{b}_j} = \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}}{\partial \xi_j} \cdot \frac{\partial \xi_j}{\partial \mathbf{w}_{jk}^i} \cdot \frac{\partial E}{\partial \hat{\mathbf{y}}} \quad (15)$$

$$= (\hat{y} - y)w_j(1 - \xi_j^2(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_j} w_{jk}^i F_k^i + b_j)) \quad (15)$$

Trong đó, $\dot{\xi}_j$ là đạo hàm ξ_j . Ta thiết lập được:

$$\xi_j = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (16)$$

Ta có $\dot{\xi}_j = 1 - \xi_j^2$

Công thức lặp lại cho các tham số w_k^i , w_j , w_{jk}^i và b_j ($k = 1, 2, \dots, K_i$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) được tóm tắt như sau:

$$w_j(t+1) = w_j(t) - \eta(\hat{y} - y)\Xi(t) \quad (17)$$

$$w_k^i(t+1) = w_k^i(t) - \eta(\hat{y} - y)F_k^i \quad (18)$$

$$w_{jk}^i(t+1) = w_j(t)F_k^i(1 - \Xi^2(t))w_{jk}^i(t) - \eta(\hat{y} - y) \quad (19)$$

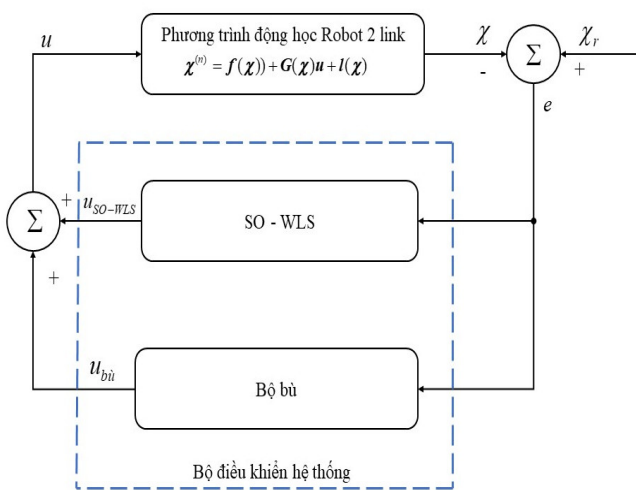
$$b_j(t+1) = w_j(t)F_k^i(1 - \Xi^2(t))b_j(t) - \eta(\hat{y} - y) \quad (20)$$

Trong đó, $\Xi(t) \triangleq \xi_j \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} w_{jk}^i(t)F_k^i + b(t) \right)$ và η là tốc

độ học.

4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Để mô phỏng hệ thống nhóm tác giả đã xây dựng bộ điều khiển hệ thống như hình 2.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển SO - WLS cho robot hai bậc tự do

Phương trình động học cánh tay robot viết dưới dạng véc tơ ta có:

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 \\ m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)g l_1 \cos \theta_1 \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Dựa vào (21) phương trình động học của cánh tay có dạng:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (22)$$

Áp dụng phương pháp WLS và SO-WLS. Thông số chi tiết và giá trị ban đầu của tay máy hai bậc được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số ban đầu của tay máy

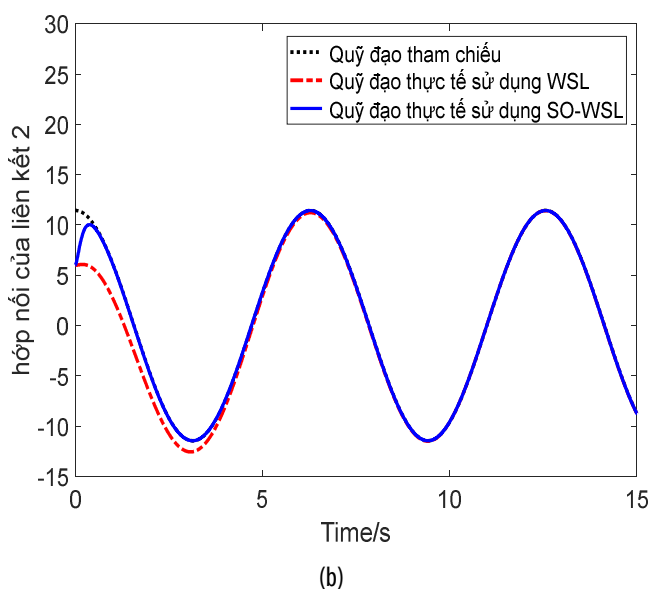
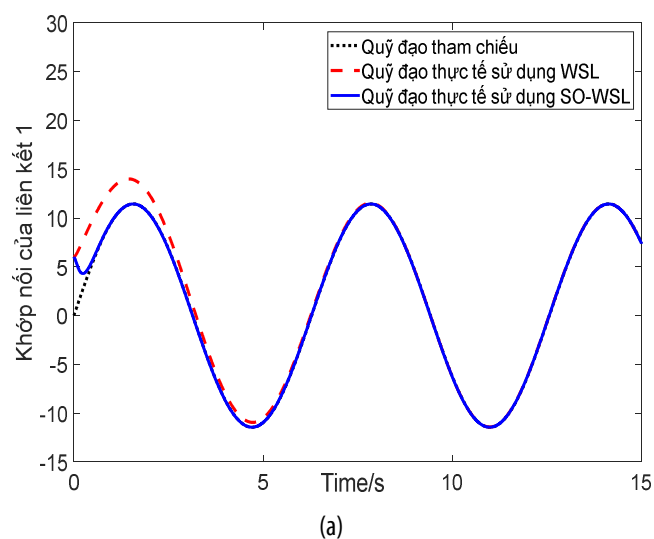
Gia tốc	$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
Momen xoắn	$u = [\tau_1 \ \tau_2]^T$
Rối loạn	$d = [d_1 \ d_2]^T = [0,5\sin(t); 0,4\sin(t)]^T$
Trọng lượng tay máy m_1 và m_2	$m_1 = 1 \text{ (kg)}, m_2 = 1 \text{ (kg)}$
Vị trí góc hệ thống robot	$q = [q_1 \ q_2]^T$
Chiều dài hai khớp tay l_1 và l_2	$l_2 = l_1 = 1$
Nửa chiều dài hai khớp tay l_1 và l_2	$r_2 = 0,5.l_2; r_1 = 0,5.l_1$
Hiệu ứng ma sát	$c_2 = \cos(q_2), s_2 = \sin(q_2),$ $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$
Điều kiện ban đầu của q_1, q_2	$q_1 = 6\pi/180 \text{ (rad)},$ $q_2(0) = 6\pi/180 \text{ (rad)}$
Điều kiện ban đầu của $\dot{q}_1, \dot{q}_2$	$\dot{q}_1 = 0, \dot{q}_2 = 0$

Bảng thông số ban đầu của bộ điều khiển được để xuất SO-WLS được trình bày ở bảng 2.

Bảng 2. Bảng thông số ban đầu của bộ điều khiển SO-WLS

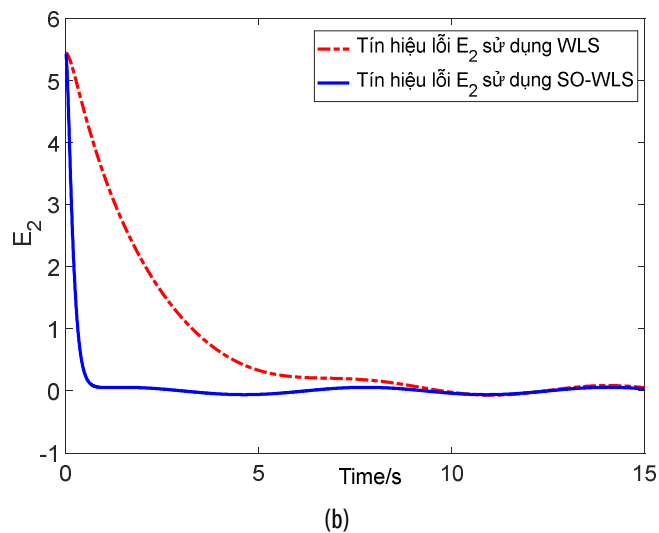
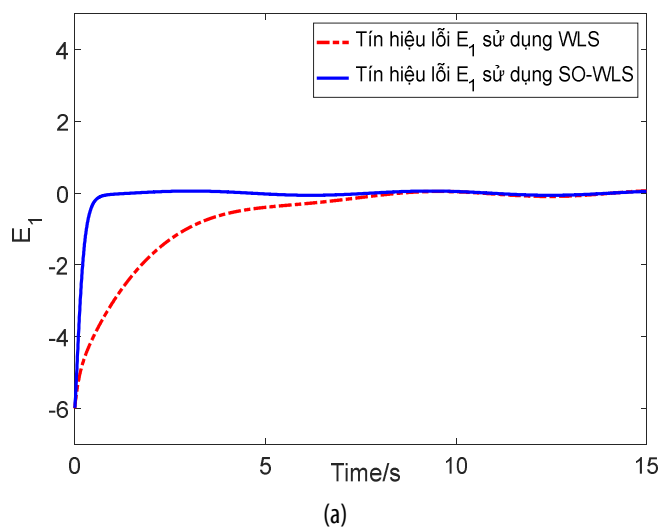
Số lượng đầu vào m	2
Số lớp n_j	2
Số đầu ra n_o	2
w_j	0,01
w_k^i	0,01
w_{jk}^i	0,01
b_j	0,01
Tốc độ học η	0,0001

Căn cứ vào bảng thông số ban đầu của tay máy và bảng thông số ban đầu của bộ điều khiển. Tiến hành xây dựng thuật toán điều khiển cho bộ điều khiển trên phần mềm Matlab Simulink và thực hiện mô phỏng. Kết quả ta thu được các tín hiệu điều khiển trong hình 3, 4, 5.

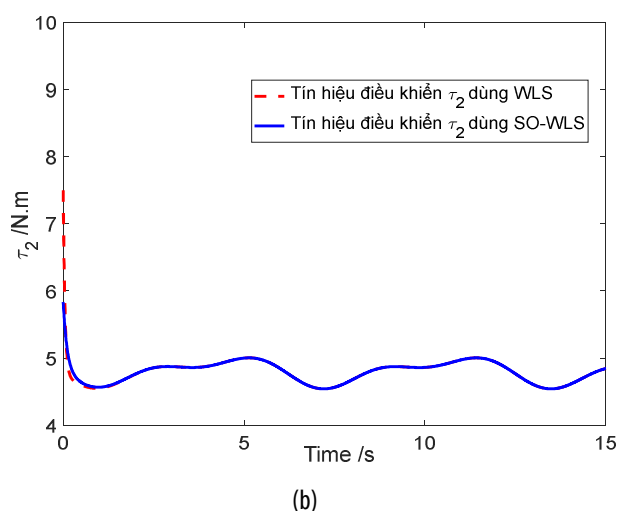
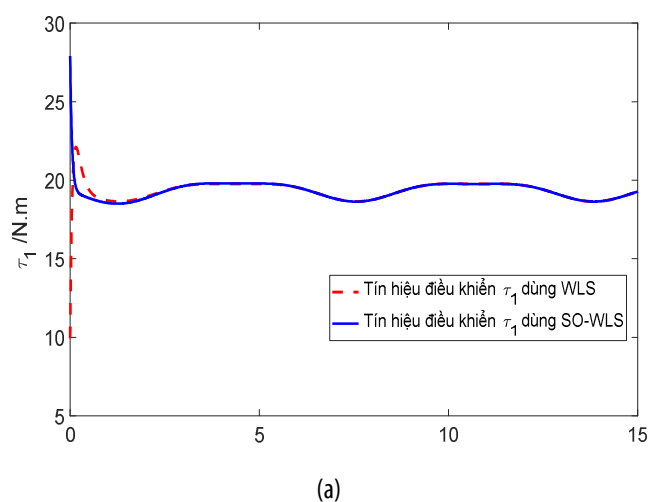


Hình 3. Tín hiệu lỗi theo dõi của khớp 1 và khớp 2 sử dụng phương pháp WLS và WO-WLS

(a) Khớp nối liên kết 1, (b) Khớp nối liên kết 2



Hình 4. Tín hiệu lỗi theo dõi của khớp 1 (a) và khớp 2 (b)



Hình 5. Các tín hiệu điều khiển của phương pháp WO-WLS

(a) tín hiệu điều khiển khớp 1, (b) Tín hiệu điều khiển khớp 2

Dựa theo kết quả mô phỏng từng cánh tay robot với hai phương pháp dùng WLS và SO - WLS được thể hiện

trong hình 5, 6 chúng ta nhận thấy rằng bộ điều khiển dùng SO - WLS luôn duy trì trạng thái ổn định luôn bám theo tham chiếu và đạt đến trạng thái xác lập nhanh hơn so với WLS. Với kết quả mô phỏng này đã thể hiện rất rõ ràng về khả năng làm việc ổn định và tính khả thi rất cao. Cuối cùng, RMSE (sai số trung bình bình phương gốc) của phương pháp đề xuất được so sánh với WLS trong bảng 3. Sai số trung bình bình phương gốc (RMSE) của phương pháp của chúng tôi thấp hơn 1.6090 lần so với WLS [2]. Điều đó chứng tỏ kỹ thuật của chúng tôi rõ ràng hoạt động tốt hơn.

Bảng 3. So sánh RMSE của phương pháp WLS và SO-WLS

Method	RMSE ₁	RMSE ₂	Average_RMSE
WLS	0,405	0,427	0,4160
SO - WLS	0,249	0,2681	0,2586

5. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển SO - WLS đã chứng minh cho chúng ta thấy tính khả thi và sự ổn định khi ứng dụng vào mô phỏng đối tượng cánh tay robot hai bậc. Trong khi đó nhờ có cả ứng dụng mạng nơ-ron, hệ thống học mở rộng học và cơ chế tự sắp xếp (Self organizing) để tạo ra các đầu vào điều khiển chính xác cho hệ thống. Từ đó chúng ta cũng cho thấy hiệu suất tốt hơn về độ chính xác điều khiển và kiểm soát nhiễu loạn. Hướng phát triển tiếp theo của nhóm là ứng dụng phương pháp đã đề xuất vào phần cứng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Duc-Hung Pham, Tuan-Tu Huynh, Chih-Min Lin, Van Nam Giap, Van-Phong Vu, "Secure transmission of medical image using a wavelet interval type-2 TSK fuzzy brain-imitated neural network," *Soft Computing*, 2024.
- [2]. S. Feng, C. L. P. Chen, "Broad learning system for control of nonlinear dynamic systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern.*, 2018.
- [3]. Duc-Hung Pham, Chih-Min Lin, Van Nam Giap, Van-Phong Vu, Hsing-Yueh Cho, "Design of missile guidance law using Takagi-Sugeno-Kang (TSK) elliptic type-2 fuzzy brain imitated neural networks," *IEEE Access*, 11, 53687-53702, 2023.
- [4]. Wei-Zhong Huang, Yang Zhao, Wei-Bin Hong, Hong-Rui He, Fei Chao, Longzhi Yang, Chih-Min Lin, Xiang Chang, Changjiang Shang, Qiang Shen, "A TOPSIS based self-organizing double loop recurrent broad learning system for uncertain nonlinear systems," in *2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, IEEE, 2022.
- [5]. I. Al-Darraj, D. Piromalis, A. A. Kakei, F. Q. Khan, M. Stojmenovic, G. Tsaramirsis, P. G. Papageorgas, "Adaptive robust controller design-based RBF neural network for aerial robot arm model," *Electronics*, 10, 7, 831, 2021.
- [6]. Ling Yi, Jinliang Ding, Changxin Liu, "Fast sensitivity-analysis-based online self-organizing broad learning system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20, 5, 2024.
- [7]. Duc-Hung Pham, Tuan-Tu Huynh, Chih-Min Lin, "Fault-tolerant control for robotic systems using a wavelet type-2 fuzzy brain emotional learning controller and a TOPSIS-based self-organizing algorithm," *International Journal of Fuzzy Systems*, 25, 1727-1741, 2023.
- [8]. Z. Deng, K. S. Choi, Y. Jiang, S. Wang, "Generalized hidden-mapping ridge regression, knowledge-leveraged inductive transfer learning for neural networks, fuzzy systems and kernel methods," *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44, 12, 2585-2599, 2014.
- [9]. Chih-Min Lin, Duc-Hung Pham, Tuan-Tu Huynh, "Synchronization of chaotic system using a brain-imitated neural network controller and its applications for secure communications," *IEEE Access*, 9, 75923-75944, 2021.
- [10]. C. P. Chen, Z. Liu, "Broad learning system: An effective and efficient incremental learning system without the need for deep architecture," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29, 1, 10-24, 2017.
- [11]. Duc-Hung Pham, Chih-Min Lin, Van-Nam Giap, "Intelligent control system design for nonlinear systems using an improved TSK wavelet type-2 fuzzy brain emotional controller," *International Journal of Fuzzy Systems*, 26, 2632-2645, 2024.

AUTHORS INFORMATION

Pham Duc Hung¹, Tran Dinh Hanh^{1,2}, Do Van Tan¹, Phan Dinh Hieu³, Pham Ngoc Thang¹

¹Faculty of Electronic and Electrical Engineering, Hung Yen University of Technology and Education, Vietnam

²Faculty of Engineering, Hanoi Industrial Textile Garment University, Vietnam

³School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam