

ĐIỀU KHIỂN BẮM THÍCH NGHI BỀN VỮNG CHO TAY MÁY ROBOT CÓ VÙNG CHẾT VÀ NHIỀU NGOÀI SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ MẠNG NƠON RBF

ROBUST ADAPTIVE TRAJECTORY TRACKING CONTROL FOR ROBOT MANIPULATORS WITH DEAD-ZONES AND EXTERNAL DISTURBANCES USING SLIDING MODE CONTROL AND RBF NEURAL NETWORKS

Nguyễn Đức Diễn, Vũ Viết Thông

Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 19/12/2025, chấp nhận đăng ngày 27/02/2026

Tóm tắt: Độ chính xác quỹ đạo của tay máy robot thường bị ảnh hưởng tiêu cực bởi nhiễu ngoài, sai số mô hình động lực học và các phi tuyến trong cơ cấu chấp hành, đặc biệt là vùng chết. Để giải quyết vấn đề này, bài báo trình bày một bộ điều khiển thích nghi bền vững kết hợp giữa điều khiển trượt và ba mạng nơon RBF. Trong cấu trúc đề xuất, mạng RBF thứ nhất đảm nhiệm việc xấp xỉ động lực học chưa biết và nhiễu bên ngoài, mạng thứ hai ước lượng đặc tính vùng chết, còn mạng thứ ba dùng để bù trừ trực tiếp ảnh hưởng phi tuyến của vùng chết. Phần tử điều khiển trượt đóng vai trò duy trì ổn định hệ thống ngay cả khi tồn tại sai số xấp xỉ và nhiễu mạnh. Các luật cập nhật tham số được thiết kế dựa trên lý thuyết Lyapunov, bảo đảm sai số hội tụ về lân cận điểm gốc. Kết quả mô phỏng trên mô hình tay máy robot cho thấy phương pháp đề xuất đạt sai số bám nhỏ và giữ được tính ổn định của hệ ngay cả khi vùng chết lớn và điều kiện nhiễu khắc nghiệt.

Từ khóa: Tay máy robot, điều khiển bám, điều khiển trượt, điều khiển thích nghi bền vững, mạng nơon.

Abstract: The tracking performance of robot manipulators is often compromised by dynamic uncertainties, external disturbances, and actuator nonlinearities such as dead zones. To overcome these issues, this study introduces a robust adaptive control framework that combines sliding mode control (SMC) with three radial basis function (RBF) neural networks. Within this framework, the first RBF network approximates unmodeled dynamics and disturbances, the second captures the dead-zone characteristics, and the third compensates for the associated nonlinear effects. The SMC component enhances robustness against approximation errors and disturbances, while adaptive update laws, designed via Lyapunov analysis, ensure that the tracking error converges to a bounded neighborhood of the origin. Simulation results on a robot manipulator validate that the proposed approach achieves high tracking accuracy and preserves system stability under severe disturbances and significant dead-zone effects.

Keywords: Robot manipulator, trajectory tracking, sliding mode control, robust adaptive control, neural networks.

1. GIỚI THIỆU

Tay máy robot đóng vai trò quan trọng trong tự động hóa công nghiệp và các ứng dụng dịch vụ hiện đại nhờ tính linh hoạt và độ chính xác

cao [1]-[3]. Tuy nhiên, khả năng bám quỹ đạo của hệ có thể suy giảm bởi nhiễu, thay đổi tải trọng, sai số mô hình và các phi tuyến như bão hòa hay vùng chết. Vì vậy, bộ điều khiển cần

được thiết kế để thích nghi với bất định và phi tuyến, bảo đảm tính bền vững và ổn định của hệ trong quá trình vận hành. Trong những năm gần đây, nhiều hướng tiếp cận đã được đề xuất để giải quyết vấn đề trên, bao gồm: điều khiển thích nghi dựa trên ước lượng tham số, điều khiển trượt (SMC), và các phương pháp xấp xỉ phi tuyến bằng mạng nơron (NN), đặc biệt là mạng cơ sở xuyên tâm (RBF). SMC có ưu điểm chống chịu tốt trước nhiễu và bất định, nhưng dễ gây hiện tượng chattering và khó triển khai thực nghiệm. Việc kết hợp SMC với NN đã cho thấy hiệu quả trong việc giảm tải tính toán và hạn chế chattering [4]-[5]. Trong đó, mạng RBF được ưa chuộng nhờ khả năng xấp xỉ mạnh và cấu trúc gọn nhẹ, giúp ước lượng động lực học chưa biết và nhiễu ngoài. Khi kết hợp RBF với SMC hoặc luật thích nghi, chất lượng bám quỹ đạo của robot được cải thiện rõ rệt [6]-[7]. Bên cạnh đó, bù phi tuyến vùng chết cũng được quan tâm đáng kể trong các nghiên cứu gần đây. Một số phương pháp khai thác NN hoặc luật thích nghi để ước lượng và bù khi biên dạng hay kích thước vùng chết chưa biết; các hướng khác ứng dụng bộ quan sát hoặc phương pháp điều khiển phi tuyến như passivity-based và adaptive backstepping để hạn chế tác động bất lợi của vùng chết [8]-[10]. Tuy nhiên, nhiều giải pháp vẫn giả định biết trước đặc trưng vùng chết hoặc tồn tại khả năng nghịch đảo, điều này ít phù hợp khi vùng chết bất đối xứng hoặc biến thiên theo thời gian. Một số công trình đã đề xuất sử dụng NN để bù vùng chết, song chưa chứng minh đầy đủ tính bền vững trên hệ thống robot nhiều bậc tự do [11]-[12].

Từ những hạn chế trên, trong bài báo đề xuất một cấu trúc điều khiển trượt kết hợp ba mạng RBF, trong đó mỗi mạng đảm nhiệm một chức

năng riêng: (i) xấp xỉ động lực học và nhiễu ngoài, (ii) ước lượng đặc tính vùng chết, và (iii) bù phi tuyến vùng chết. Thiết kế này đơn giản hóa luật thích nghi, đồng thời bảo đảm sai số bám nhỏ và tính ổn định vững chắc ngay cả khi hệ chịu vùng chết lớn và nhiễu phức tạp.

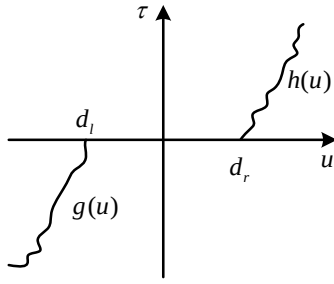
2. MÔ TẢ TOÁN HỌC HỆ THỐNG

Xét một tay máy robot hai bậc tự do gồm các khớp quay, trong đó động lực học tổng quát của hệ được mô tả bởi phương trình sau [3]:

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

với $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ lần lượt biểu diễn vector vị trí, vận tốc và gia tốc khớp; $M(q), C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ lần lượt là ma trận tính và Coriolis và ly tâm; $G(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$

là vector mômen trọng lực; $\Delta d = \Delta M\ddot{q} + \Delta C\dot{q} + \Delta G + \tau_d \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ biểu diễn nhiễu tổng hợp, bao gồm sai số mô hình và nhiễu ngoài τ_d , trong đó ΔM , ΔC , ΔG lần lượt là các thành phần chưa biết của M , C , G . Thành phần $\tau \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ là vector mômen tác động lên các khớp. Trong điều kiện lý tưởng, mômen thực tế trùng khớp với tín hiệu điều khiển do bộ điều khiển tính toán. Tuy nhiên, trong thực tế, sự khác biệt giữa tín hiệu đặt và mômen đầu ra thường xuất hiện do đặc tính động học của cơ cấu chấp hành và các phi tuyến nội tại. Một trong những phi tuyến điển hình là hiện tượng vùng chết, khi tín hiệu điều khiển có biên độ nhỏ bị triệt tiêu cho đến khi vượt qua một ngưỡng nhất định. Đối với tay máy robot, vùng chết có thể làm suy giảm khả năng bám quỹ đạo và gây sai số nếu không được bù thích hợp. Hình 1 minh họa đặc tính phi tuyến vùng chết $D(u)$ trong trường hợp τ và u là các đại lượng vô hướng; về tổng quát, chúng là các vector.



Hình 1. Đặc tính vùng chết

Mô tả toán học của đặc tính vùng chết trong Hình 1 được cho bởi [13]:

$$\tau = D(u) = \begin{cases} g(u) < 0, u \leq d_l \\ 0, -d_l < u < d_r \\ h(u) > 0, u \geq d_r \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó $h(u)$, $g(u)$, d_l , và d_r đều chưa biết trước.

Thuộc tính 1: Các ma trận $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $G(q)$, Δd là bị chặn. $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ là ma trận đối xứng lệch.

Giả thiết 1: Các hàm phi tuyến $h(u)$ và $g(u)$ là trơn và khả nghịch.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Mục tiêu điều khiển là thiết kế tín hiệu điều khiển sao cho $q(t)$ bám theo quỹ đạo mong muốn $q_d(t)$ với sai số nhỏ, bất chấp sự tồn tại của các bất định, ảnh hưởng của vùng chết và nhiễu ngoài, với sai số bám được định nghĩa là $e(t) = q_d(t) - q(t)$. Bộ điều khiển được thiết kế theo cấu trúc phân lớp như sau: đầu tiên, bộ điều khiển trượt kết hợp với mạng RBF ước lượng bất định động lực học và nhiễu ngoài để sinh ra tín hiệu điều khiển ω . Tín hiệu này sau đó được đưa vào bộ bù vùng chết nhằm tạo ra tín hiệu điều khiển u . Cuối cùng, tín hiệu u đi qua đặc tính phi tuyến vùng chết của bộ chấp hành và hình thành mômen điều khiển τ tác động lên hệ thống.

3.1. Bộ điều khiển trượt kết hợp mạng RBF cho ước lượng bất định và nhiễu

Đầu tiên, bộ điều khiển trượt được xây dựng

với hai phần chính: điều khiển tương đương u_{eq} và điều khiển chuyển mạch u_{sw} , nghĩa là $u_s = u_{eq} + u_{sw}$. Mặt trượt được lựa chọn là

$$\sigma = \dot{e} + \Gamma e, \quad (3)$$

trong đó Γ là ma trận xác định dương. Mặt trượt này đảm bảo rằng khi $\sigma = 0$, cả e và $\dot{e}$ đều tiến về 0. Động lực học sai số bám được xác định như sau:

$$\begin{aligned} M\dot{\sigma} &= M(\ddot{e} + \Gamma\dot{e}) = M(\ddot{q}_d - \ddot{q} + \Gamma\dot{e}) \\ &= M(\ddot{q}_d + \Gamma\dot{e}) - C\sigma + C(\dot{q}_d + \Gamma e) + G + \Delta d - \tau \end{aligned} \quad (4)$$

Để xây dựng u_{eq} , ta xét điều kiện $\dot{\sigma} = 0$. Từ (4), tín hiệu điều khiển để triệt tiêu động lực học của hệ được xác định là

$$u_{eq} = M(\ddot{q}_d + \Gamma\dot{e}) + C(\dot{q}_d + \Gamma e) + G \quad (5)$$

Bởi hệ thống có tồn tại bất định và nhiễu, nên cần bổ sung thành phần điều khiển chuyển mạch để đảm bảo tính bền vững trong giai đoạn đầu, được xác định như sau:

$$u_{sw} = -K_1 \text{sgn}(\sigma) \quad (6)$$

với $K_1 > 0$, hàm $\tanh(\bullet)$ thay thế $\text{sgn}(\bullet)$ nhằm giảm chattering. Để bù thành phần bất định và nhiễu tổng trong toàn suốt quá trình vận hành, mạng nơron RBF (RBF1) được dùng để xấp xỉ chúng, có dạng như sau:

$$Y(x) = W^T \Phi(x) + \varepsilon \quad (7)$$

trong đó $x = [q_d^T, \dot{q}_d^T, q^T, \dot{q}^T]^T$, $\Phi(x)$ là vector các hàm cơ sở Gauss, với $\Phi_j = \exp(-\|x - c_j\|^2 / b_j^2)$, $i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, m$, m là số nơron lớp ẩn, c_j là tâm, b_j là độ rộng, ε là sai số xấp xỉ ($\|\varepsilon\| \leq b_\varepsilon$), $W = [W_1, W_2, \dots, W_m]^T$ là vector trọng số lý tưởng thỏa mãn $\|W\|_F \leq W_m$ ($\|\cdot\|_F$ là chuẩn Frobenius). Khi đó, thành phần bù bất định và nhiễu trong luật điều khiển được viết:

$$\hat{Y}(x) = \hat{W}^T \Phi(x) \quad (8)$$

trong đó $\hat{W}$ là trọng số xấp xỉ. Sai số trọng số được định nghĩa $\tilde{W} = W - \hat{W}$, (4) trở thành

$$M\dot{\sigma} = -C\sigma + \tilde{W}^T \Phi + \varepsilon + u_{sw} \quad (9)$$

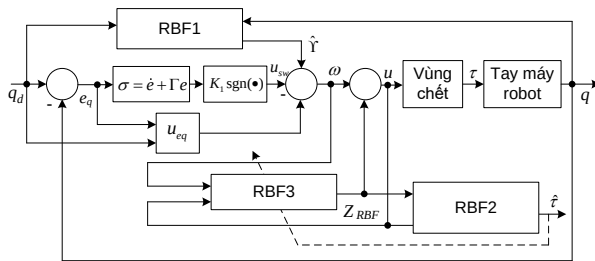
Để bảo đảm khả năng thích nghi và hội tụ của mạng RBF1, một luật cập nhật trọng số được thiết lập dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Khi xét hàm Lyapunov chứa sai số trượt σ và sai số trọng số $\tilde{W}$ việc lựa chọn luật cập nhật sao cho các hạng chứa $\tilde{W}$ bị triệt tiêu sẽ bảo đảm tính ổn định của hệ. Luật cập nhật được xác định như sau:

$$\dot{\hat{W}} = K_2 \Phi(x) \sigma^T \quad (10)$$

với $K_2 = K_2^T > 0$. Từ (5), (6), (8), tín hiệu điều khiển do bộ điều khiển trượt và mạng RBF tạo ra là

$$\omega = u_{eq} + u_{sw} + \hat{Y}(x) \quad (11)$$

Như vậy, (5) thể hiện phần điều khiển lý tưởng bảo đảm bám quỹ đạo trong điều kiện danh định, còn (6) duy trì tính bền vững khi mạng RBF1 chưa hội tụ. Đối với vùng chết, một mạng RBF (RBF2) được dùng để ước lượng và một mạng khác (RBF3) để bù, nội dung này sẽ được trình bày chi tiết ở phần sau. Cấu trúc bộ điều khiển đề xuất được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển

3.2. Bộ bù vùng chết

Một cách tiếp cận phổ biến để triệt tiêu hiệu ứng bất lợi của vùng chết là áp dụng bộ bù phía trước. Cơ chế này yêu cầu xây dựng

nghịch đảo của phi tuyến vùng chết. Dựa trên Giả thiết 1, có thể khẳng định tồn tại $D^{-1}(\omega)$ thỏa điều kiện $D(D^{-1}(\omega)) = \omega$. Nghịch đảo vùng chết được biểu diễn dạng

$$D^{-1}(\omega) = \omega + Z_{RBF}(\omega) \quad (12)$$

trong đó

$$Z_{RBF}(\omega) = \begin{cases} g^{-1}(\omega) - \omega, & \omega < 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ h^{-1}(\omega) - \omega, & \omega > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Tương tự như biểu thức xấp xỉ (7), vùng chết được xấp xỉ bởi

$$\tau = D(u) = W_{d1} \Phi_{d1}(u) + \varepsilon_{d1}(u) \quad (14)$$

và nghịch đảo vùng chết được xấp xỉ bởi

$$Z_{RBF}(\omega) = W_{d2} \Phi_{d2}(\omega) + \varepsilon_{d2}(\omega) \quad (15)$$

Ký hiệu $\hat{W}_{d1}$, $\hat{W}_{d2}$ là ước lượng của các trọng số mạng neuron lý tưởng. Sai số ước lượng trọng số được định nghĩa là $\tilde{W}_{d1} = W_{d1} - \hat{W}_{d1}$, $\tilde{W}_{d2} = W_{d2} - \hat{W}_{d2}$, ε_{d1} và ε_{d2} là sai số xấp xỉ ($\|\varepsilon_{d1}\| \leq b_{\varepsilon 1}$, $\|\varepsilon_{d2}\| \leq b_{\varepsilon 2}$). Các xấp xỉ của hàm vùng chết và hàm nghịch đảo vùng chết lần lượt được biểu diễn bởi

$$\hat{\tau} = \hat{D}(u) = \hat{W}_{d1} \Phi_{d1}(u) \quad (16)$$

$$\hat{Z}_{RBF}(\omega) = \hat{W}_{d2} \Phi_{d2}(\omega) \quad (17)$$

Hai mạng RBF được sử dụng lần lượt để xấp xỉ vùng chết và nghịch đảo vùng chết. Do đó, luật cập nhật trọng số cần bảo đảm khả năng bù chính xác trong điều kiện bất định, đồng thời giảm tương tác giữa hai mạng và giới hạn tốc độ thích nghi nhằm tránh dao động khi có nhiễu hoặc sai số lớn. Luật cập nhật trọng số được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{W}}_{d1} = -K_3 \Phi_{d1}'(u) \hat{W}_{d2}^T \Phi_{d2}(\omega) - k_1 K_3 \|\sigma\| \hat{W}_{d1} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_{d2} = & -K_4 \Phi_{d2}(\omega) \sigma^T \hat{W}_{d1}^T \Phi_{d1}(u) - k_1 K_4 \|\sigma\| \hat{W}_{d2} \\ & - k_2 K_4 \|\sigma\| \|\hat{W}_{d2}\|_F \hat{W}_{d2}, \end{aligned} \quad (19)$$

với $K_3 = K_3^T > 0$, $K_4 = K_4^T > 0$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$. Khi đó, sai số của hệ được bảo đảm ổn định và bị chặn đều tiệm cận (UUB - Uniformly Ultimately Bounded). Từ (11) và (17), tín hiệu điều khiển u được xác định là

$$u = \omega + \hat{Z}_{RBF}(\omega) \quad (20)$$

3.3. Phân tích tính ổn định và hội tụ

Để phân tích ổn định hệ thống, chọn hàm Lyapunov bao gồm sai số trượt và các sai số trọng số của ba mạng RBF trong bộ điều khiển: RBF1 dùng để xấp xỉ phi tuyến chưa biết với sai số trọng số $\tilde{W}$, RBF2 dùng để ước lượng vùng chết với sai số $\tilde{W}_{d1}$, và RBF3 dùng để bù ảnh hưởng vùng chết với sai số $\tilde{W}_{d2}$. Hàm Lyapunov được chọn như sau [13]:

$$L = \frac{1}{2} \sigma^T M \sigma + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T K_2^{-1} \tilde{W}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_{d1}^T K_3^{-1} \tilde{W}_{d1}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_{d2}^T K_4^{-1} \tilde{W}_{d2}). \quad (21)$$

Lấy đạo hàm (21), sau đó kết hợp với (6), (9), (10), (18), (19), thuộc tính (1), và chú ý $\dot{\tilde{W}} = -\dot{\tilde{W}}$, $\dot{\tilde{W}}_{d1} = -\dot{\tilde{W}}_{d1}$, $\dot{\tilde{W}}_{d2} = -\dot{\tilde{W}}_{d2}$, thu được kết quả sau:

$$\begin{aligned} \dot{L} = & \sigma^T \varepsilon - \|\sigma\| K_1 + k_1 \|\sigma\| \text{tr}(\tilde{W}_{d1}^T (W_{d1} - \tilde{W}_{d1})) \\ & + \|\sigma\| \text{tr}(\tilde{W}_{d2}^T k_1 (W_{d2} - \tilde{W}_{d2}) + \tilde{W}_{d2}^T k_2 \|W_{d2}\|_F (W_{d2} - \tilde{W}_{d2})). \end{aligned} \quad (22)$$

Áp dụng bất đẳng thức $\text{tr}(\tilde{W}^T (W - \tilde{W})) = (\tilde{W}, W)_F - \|\tilde{W}\|_F^2 \leq \|\tilde{W}\|_F \|W\|_F - \|\tilde{W}\|_F^2$, và áp dụng một số phép biến đổi toán học, ta thu được kết quả

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & \sigma^T \varepsilon - \|\sigma\| K_1 - \|\sigma\| \left\{ k_1 \left(\|\tilde{W}_{d1}\|_F - \frac{1}{2} W_{d1M} \right)^2 \right. \\ & \left. - \frac{1}{4} k_1 W_{d1M}^2 + g(\|\tilde{W}_{d2}\|_F) \right\}, \end{aligned} \quad (23)$$

trong đó

$$g(\|\tilde{W}_{d2}\|_F) = k_2 \|\tilde{W}_{d2}\|_F^3 + (k_1 - 2k_2 W_{d2M}) \|\tilde{W}_{d2}\|_F^2 - (k_1 W_{d2M} - k_2 W_{d2M}^2) \|\tilde{W}_{d2}\|_F.$$

Định nghĩa $h(\|\tilde{W}_{d2}\|_F) = g(\|\tilde{W}_{d2}\|_F) + C \geq 0$, với $C = \inf \{g(\bullet), \bullet > 0\}$, (22) trở thành

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & \sigma^T \varepsilon - \|\sigma\| K_1 - \|\sigma\| \left\{ k_1 \left(\|\tilde{W}_{d1}\|_F - \frac{1}{2} W_{d1M} \right)^2 \right. \\ & \left. - \left(\frac{1}{4} k_1 W_{d1M}^2 + C \right) + h(\|\tilde{W}_{d2}\|_F) \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Tham số K_1 được chọn thỏa mãn $K_1 > b_\varepsilon$, dẫn đến $\sigma^T \varepsilon - \|\sigma\| K_1 \leq 0$. Do đó, $\dot{L}$ đảm bảo âm khi và chỉ khi

$$\|\tilde{W}_{d1}\|_F > \sqrt{\frac{1}{4} W_{d1M}^2 + C} + \frac{1}{2} W_{d1M}, \quad (25)$$

hoặc

$$\|\tilde{W}_{d2}\|_F > \max \left\{ h^{-1} \left(\frac{1}{4} k_1 W_{d1M}^2 + C \right) \right\} \quad (26)$$

Vì vậy, có thể kết luận rằng hệ thống ổn định theo nghĩa UUB.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

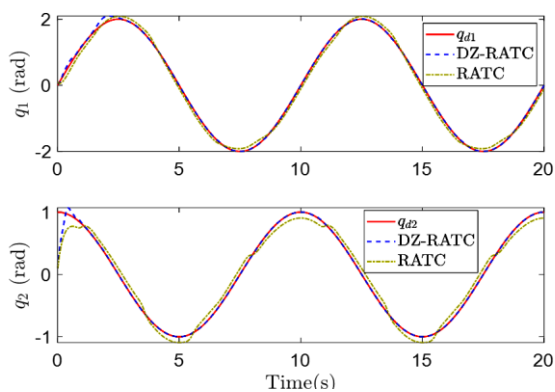
Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, các mô phỏng được thực hiện trên tay máy robot hai bậc tự do có các ma trận động lực học được cho bởi [14]:

$$\begin{aligned} M(q) &= \begin{bmatrix} \varsigma_1 + \varsigma_2 + 2\varsigma_3 \cos q_2 & \varsigma_2 + \varsigma_3 \cos q_2 \\ \varsigma_2 + \varsigma_3 \cos q_2 & \varsigma_2 \end{bmatrix} \\ C(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} -\varsigma_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -\varsigma_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ \varsigma_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix}, \\ G(q) &= [\varsigma_4 \cos q_1 + \varsigma_5 \cos(q_1 + q_2) \quad \varsigma_5 \cos(q_1 + q_2)]^T \end{aligned} \quad (27)$$

trong đó $\varsigma_1 = 2.9$, $\varsigma_2 = 0.76$, $\varsigma_3 = 0.87$, $\varsigma_4 = 29.8$, $\varsigma_5 = 8.5$, $q(0) = [0.1, 0.1]^T$. Các bất định động lực học được mô phỏng bằng cách giả thiết các tham số trong M , C , và G sai lệch ngẫu nhiên $\pm 15\%$ so với giá trị danh định.

Đồng thời, hệ thống chịu nhiễu hình sin có biên độ 0.5Nm và tần số 2 rad/s, và nhiễu trắng ngẫu nhiên có biên độ 0,1 Nm tác động lên từng khớp. Các tham số của vùng chết là $d_r=10$, $d_l=-10$, $h(u)=u-d_r$, $g(u)=u+d_l$. Quỹ đạo mong muốn $q_d(t)=[2\sin(0.2\pi t), \cos(0.2\pi t)]^T$. Các tham số bộ điều khiển đề xuất (DZ-RATC) được thiết lập là $\Gamma = \text{diag}[5,5]$, $K_2 = \text{diag}[10,10]$, $K_3 = \text{diag}[100,100]$, $K_4 = \text{diag}[100,100]$, $K_1 = 0.5$, $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.5$, $c_i = [-1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5]$, $b_i=100$, số neuron lớp ẩn là 7, tương ứng trọng số cho 2 khớp là 14.

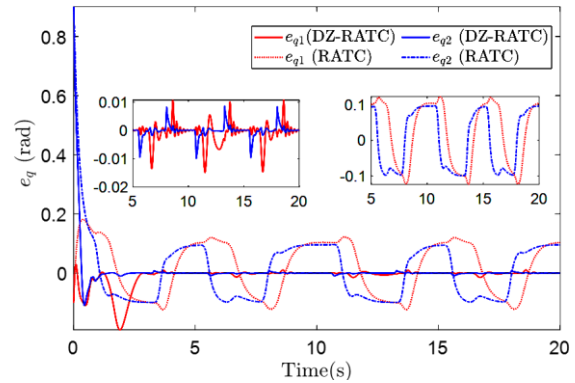
Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển DZ-RATC được so sánh với phương pháp điều khiển bám thích nghi bền vững (RATC) trong [15], vốn chưa xét đến ảnh hưởng của vùng chết, nhằm làm nổi bật ưu điểm của DZ-RATC.



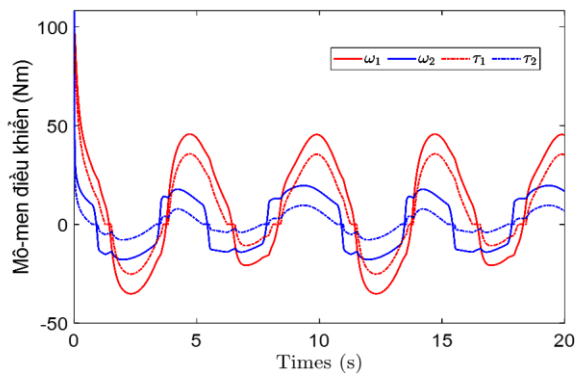
Hình 3. Bám quỹ đạo của các bộ điều khiển

Hình 3 và Hình 4 thể hiện quỹ đạo bám và sai số bám của các bộ điều khiển. Kết quả cho thấy, khi không có cơ chế bù, quỹ đạo thực bị trễ và lệch đáng kể so với quỹ đạo tham chiếu, với sai số dao động trong khoảng từ -0,1 đến 0,1 rad. Ngược lại, khi áp dụng bộ bù DZ-RATC, quỹ đạo thực gần như trùng khớp với quỹ đạo mong muốn, và sai số nhanh chóng hội tụ, duy trì ổn định với giá trị cực đại chỉ

khoảng 0,01 rad.

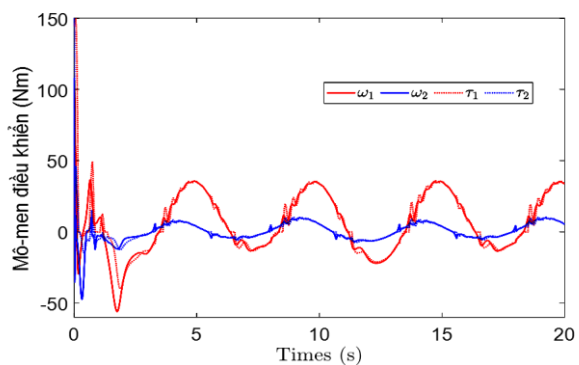


Hình 4. Sai số bám của các bộ điều khiển

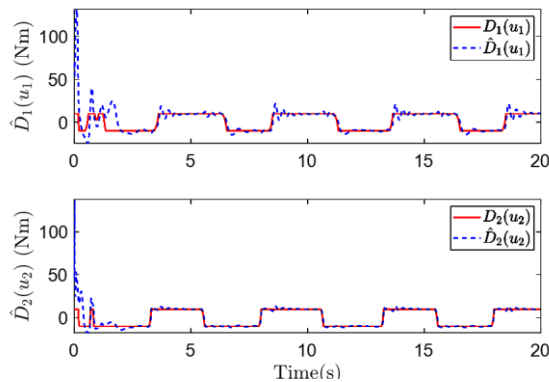


Hình 5. Mômen điều khiển của RATC

Hình 5 và Hình 6 trình bày tín hiệu điều khiển và mômen sau vùng chết của các bộ điều khiển. Khi không có bù (Hình 5), mômen bị méo dạng và lệch đáng kể so với ω . Ngược lại, khi áp dụng DZ-RATC (Hình 6), $\tau \approx \omega$, chứng tỏ cơ chế bù đã hiệu chỉnh chính xác vùng chết. Đồng thời, kết quả ước lượng vùng chết thể hiện như Hình 7 cho thấy mạng RBF thích nghi trực tuyến và tái tạo chính xác quan hệ phi tuyến $D(u)$.



Hình 6. Mômen điều khiển của DZ-RATC



Hình 7. Đặc tính và ước lượng vùng chết

Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển DZ-RATC không chỉ duy trì tính ổn định bền vững trước bất định động lực học và nhiễu ngoài mà còn bù hiệu quả ảnh hưởng của vùng chết. So với cấu hình không bù, phương pháp

đề xuất đạt sai số bám nhỏ hơn, quỹ đạo chính xác hơn, qua đó khẳng định tính khả thi và hiệu quả vượt trội của cấu trúc điều khiển.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày bộ điều khiển bám thích nghi bền vững kết hợp SMC và ba mạng RBF để xử lý nhiễu, bất định và phi tuyến vùng chết trong tay máy robot. Bộ điều khiển đảm bảo ổn định và sai số bám nhỏ ngay cả với nhiễu mạnh và vùng chết lớn. Kết quả mô phỏng chứng minh hiệu quả của phương pháp đề xuất. Nghiên cứu tương lai sẽ tập trung vào triển khai thực nghiệm và tối ưu hóa cấu trúc mạng nhằm giảm tải tính toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Liu, L. Wang, and R. X. Gao. Cognitive neuroscience and robotics: Advancements and future research directions. *Robotics Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, p. 102610, 2023.
- [2] 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.
- [3] J. Liu and X. Wang. *Adaptive sliding mode control for mechanical systems*. Springer, 2011.
- [4] Truong, Thanh Nguyen, Anh Tuan Vo, and Hee-Jun Kang. Neural network-based sliding mode controllers applied to robot manipulators: A review. *Neurocomputing*, vol. 562, pp. 126896, 2023.
- [5] Tao, Yong, Jiaqi Zheng, and Yuanchang Lin. A sliding mode control-based on a RBF neural network for deburring industry robotic systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13.1, pp.8, 2016.
- [6] Li, Yan, et al.. RBF neural network dynamic sliding mode control based on lambert W function for piezoelectric stick-slip actuator. *Review of Scientific Instruments*, vol. 95.6, 2024.
- [7] Al-Darraj, Izzat, et al.. Adaptive robust controller design-based RBF neural network for aerial robot arm model. *Electronics*, vol. 10.7, pp. 831, 2021.
- [8] Zhao, Xingqiang, Zhen Liu, and Quanmin Zhu. Neural network-based adaptive controller design for robotic manipulator subject to varying loads and unknown dead-zone. *Neurocomputing*, vol. 546, pp. 126293, 2023.
- [9] Rauf, Arshad, et al.. Finite-time robust control of robotic manipulator with input deadzone and time-varying disturbance compensation. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 45.6, pp. 1140-1147, 2023.
- [10] Chan-Zheng, Carmen, Pablo Borja, and Jacqueliën MA Scherpen. Dead-zone compensation via passivity-based control for a class of mechanical systems. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56.1, pp. 319-324, 2023.

- [11] Zhao, Xingqiang, Zhen Liu, and Quanmin Zhu. Neural network-based adaptive controller design for robotic manipulator subject to varying loads and unknown dead-zone. *Neurocomputing*, vol. 546, pp. 126293, 2023.
- [12] Wu, Yifan, et al.. Fixed-time neural network control of a robotic manipulator with input deadzone. *ISA transactions*, vol. 135, pp. 449-461, 2023.
- [13] Selmic, Rastko R., and Frank L. Lewis. Deadzone compensation in motion control systems using neural networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45.4, pp. 602-613, 2002.
- [14] J. Liu. *Intelligent Control Design and MATLAB Simulation*. Springer, 2018.
- [15] V.T. Yen, W.Y. Nan, and P. Van Cuong. Robust adaptive sliding mode neural networks control for industrial robot manipulators. *International Journal of Control, Automation Systems*, vol. 17, pp. 783-792, 2019.

Thông tin liên hệ: **Nguyễn Đức Diễn**

Điện thoại: 0912970845 - Email: nddien@uneti.edu.vn

Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp