

ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI BỀN VỮNG TRÊN CƠ SỞ MẠNG NƠ-RON CHO RÔ-BỐT TAY MÁY

Nguyễn Thị Thu Hiền, Vũ Văn Tú, Nguyễn Thị Thắm

Khoa Điện Cơ

Email: hienntt@dhhp.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/11/2021

Ngày PB đánh giá: 05/01/2022

Ngày duyệt đăng: 10/01/2022

TÓM TẮT: Bài báo trình bày một thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho rô-bốt tay máy, bộ điều khiển là sự kết hợp của bộ điều khiển thích nghi bền vững và mạng nơ-ron. Bộ điều khiển thích nghi bền vững đảm bảo rô-bốt tay máy bám theo quỹ đạo mong muốn và bất định mô hình. Các hàm không xác định của rô-bốt tay máy được xấp xỉ gần đúng bằng mạng nơ-ron. Phân tích ổn định của hệ kín được đưa ra bởi phân tích lý thuyết. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả và khả năng ứng dụng thực tế của phương pháp điều khiển được đề xuất..

Từ khóa: Điều khiển thích nghi bền vững, Mạng nơ-ron, Điều khiển bám quỹ đạo, Rô-bốt tay máy.

ROBUST ADAPTIVE CONTROL BASING ON THE NEURAL NETWORK FOR ROBOT MANIPULATORS

ABSTRACT: The paper presents a recently developed trajectory tracking control algorithm for Robot Manipulators, which incorporates hierarchical robust adaptive control and neural networks. Robust adaptive control ensures that the Robot Manipulators tracks desired trajectory and resist disturbance. The unknown functions of Robot Manipulators approximate the neural networks. The stability analysis of the closed-loop system will be given through the theoretical analysis. Numerical simulation results show the effectiveness and the capability for practical applications of the proposed control method.

Keywords: Adaptive robust control, Neural network, Trajectory tracking control, Robot Manipulators..

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chuyển động của một nhóm các hệ thống vật lý như rô-bốt tay máy (Robot Manipulators), tàu, tàu nổi (SVs), thiết bị bay không người lái (UAV)... được coi là hệ thống cơ học có mô hình phi tuyến bất định và chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài [1]. Để giải quyết mô hình phi tuyến với các thành phần bất định và nhiễu loạn không xác định thì bộ điều khiển trượt (SMC) là một trong những giải pháp hữu hiệu để xem xét sự hội tụ của thông số trong thời gian hữu hạn. Trong công trình [2] một bộ điều khiển trượt đầu cuối thích nghi được áp dụng dựa trên trượt bề mặt đầu cuối cho tay máy. Một số kỹ thuật cũng được phát triển bài toán điều khiển phản hồi đầu ra với bộ điều khiển ảo đầu vào tích hợp [3, 4]. Mặt khác trong các công trình này, thành phần bất định trong mô hình và nhiễu ngoài trong thiết kế điều khiển thường được ước lượng bằng mạng nơ-ron (neural network) và phương pháp mờ (fuzzy). Tuy nhiên, các kỹ thuật điều khiển phi tuyến cổ điển nói trên có một số thách thức chẳng hạn như hàm Lyapunov tích hợp, các thành phần bù xung động như trong các công trình [5–7]. Giải pháp điều khiển tối ưu có giải quyết bài toán ràng buộc đầu vào bằng cách xem xét tối ưu hóa dựa trên ràng buộc và bộ điều khiển dự báo (MPC) [8–10] là những phương pháp hiệu quả để giải quyết các khó khăn của rô-bốt tay máy. Tuy nhiên một bộ điều

khíến tập trung giải quyết tám quỹ đạo, hoạt động ổn định trong điều kiện bất định mô hình, chịu tác động của nhiễu chưa biết là chưa được nghiên cứu.

Trong bài báo này, dựa trên thiết kế bộ điều khiển được nghiên cứu trong công trình [11] nhưng trong thiết kế điều khiển của [11] luật điều khiển dựa trên xấp xỉ các thành phần bất định mô hình và luật điều khiển bền vững chưa được thiết kế. Do đó bài viết sẽ tập trung vào những nội dung sau:

1. Xây dựng luật điều khiển dựa trên xấp xỉ các thành phần bất định trong mô hình bằng mạng nơ-ron RBF, xây dựng luật điều khiển bền vững dựa trên lý thuyết điều khiển trượt (SMC) mà công trình [11] chưa giải quyết được.
2. Bộ điều khiển được xây dựng mới trên cơ sở kết hợp bộ điều khiển được thiết kế và đề cập tại công trình [11] kết hợp với các luật điều khiển bền vững và mạng nơ-ron được thiết kế trong bài báo này sẽ đảm bảo hệ ổn định, tính ổn định của hệ được chứng minh qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Xét hệ thống rô-bốt tay máy được mô tả như sau:

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

Trong đó $M(\eta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận quán tính, $C(\eta, \dot{\eta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ma trận hướng tâm và Coriolis, $G(\eta) \in \mathbb{R}^n$ véc-tơ lực đẩy và mô-men, η được định nghĩa là vị trí của tay máy, $\tau \in \mathbb{R}^n$ véc-tơ của đầu vào điều khiển, $M(\eta), C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ là những hàm chưa biết.

Sử dụng mạng nơ-ron để xấp xỉ các hàm $M(\eta), C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ bất định chưa biết, mạng nơ-ron được sử dụng ở phần nghiên cứu này là mạng nơ-ron hướng tâm (RBF). Mạng RBF có thể được coi là hai lớp, trong đó lớp ẩn bao gồm các phân tử nơ-ron hướng tâm, lớp đầu ra là một nơ-ron tuyến tính được mô tả như sau:

$$\hat{f}(Z) = \sum_{i=1}^n w_i s_i(Z) = W^T S(Z) \quad (2)$$

Trong đó $Z \in \Omega_Z$ là véc-tơ đầu vào, $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T \in \mathbb{R}^n$ là véc-tơ trọng số, $N > 1$ là số nút mạng nơ-ron, $S(Z) = [s_1(Z), s_2(Z), \dots, s_N(Z)]^T$ là véc-tơ hồi quy với $s_i(\cdot)$ là một hàm xuyên tâm, thường sử dụng hàm xuyên tâm là một hàm Gaussian:

$$s_i(Z) = \exp \left[\frac{-(Z - \mu_i)^T (Z - \mu_i)}{\zeta_i^2} \right], i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Trong đó $\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iq}]^T$ là trọng tâm của hàm hướng tâm và ζ_i là độ tản.

Đối với hàm liên tục trơn bất kỳ $f(Z) : \Omega_Z \rightarrow \mathbb{R}$, trong đó Ω_Z là một tập compact, hàm $f(Z)$ được xấp xỉ bằng mạng nơ-ron (2) (với số nơ-ron lớp vào n là đủ lớn), luôn tồn tại một véc-tơ trọng số W^* sao cho tương ứng với mỗi ε^* nhỏ tùy ý ta có:

$$\max_{Z \in \Omega_Z} |f(Z) - W^{*T} S(Z)| < \varepsilon^* \quad (4)$$

hay

$$f(Z) = W^{*T} S(Z) + \varepsilon(Z), \forall Z \in \Omega_Z \quad (5)$$

Trong đó $|\varepsilon(Z)| < \varepsilon^*$, mạng nơ-ron RBF $W^{*T} S(Z)$ với một số lượng lớn RBF đủ lớn có thể xấp xỉ đồng dạng một hàm trơn $f(Z) : \Omega_Z \rightarrow \mathbb{R}$ với sai số ε^* nhỏ bao nhiêu tùy ý.

Kết hợp phương trình (2) và (4), ta có:

$$\Delta f = \hat{f}(Z) - f(Z) = \tilde{W}^T S(Z) - \varepsilon \quad (6)$$

Trong đó: $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$, $\hat{W}$ là ước lượng của W^* .

Bài báo sử dụng mạng nơ-ron hướng tâm RBF để ước lượng các hàm chưa xác định $M(\eta), C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ tương ứng như sau:

$$M(\eta) = M_{NN}(\eta) + \varepsilon_M \quad (7)$$

$$C(\eta, \dot{\eta}) = C_{NN}(\eta, \dot{\eta}) + \varepsilon_C \quad (8)$$

$$G(\eta) = G_{NN}(\eta) + \varepsilon_G \quad (9)$$

Trong đó $\varepsilon_M, \varepsilon_C, \varepsilon_G$ là sai lệch mô hình của $M(\eta), C(\eta, \dot{\eta})$ và $G(\eta)$ tương ứng. Tiếp sau ta có:

$$\begin{aligned} M(\eta)\ddot{\eta}_r + C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_r + G(\eta) &= M_{NN}(\eta)\ddot{\eta}_r + C_{NN}(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_r + G_{NN}(\eta) + \varepsilon \\ &= [W_M^T S_M(\eta)]\ddot{\eta} + [W_C^T S_C(z)]\dot{\eta} + [W_G^T S_G(\eta)] + \varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

Trong đó W_M, W_C và W_G là véc-tơ trọng số lý tưởng của mạng RBF, $S_M(\eta), S_C(\eta), S_G(\eta)$ là đầu ra của lớp ẩn và $\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_C + \varepsilon_G$, $z = [\eta \ \dot{\eta}]^T$.

Giả thiết 1: Véc-tơ vị trí η và đạo hàm $\dot{\eta}$ của nó bị chặn bởi hằng số dương $\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2$ sao cho $\|\eta\| \leq \bar{\eta}_1, \|\dot{\eta}\| \leq \bar{\eta}_2$.

Giả thiết 2: Nếu $\eta, \dot{\eta}$ bị chặn thì tất cả những hàm này $C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ bị chặn. Hơn thế, nếu $\eta, \dot{\eta}$ bị chặn thì đạo hàm riêng phần bậc nhất và bậc hai của các thành phần $C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ theo η là tồn tại và bị chặn.

Giả thiết 3: Quỹ đạo mong muốn η_d được thiết kế sao cho đạo hàm theo thời gian thứ i của $\eta_d \forall i = 0, 1, \dots, 4$ là tồn tại và bị chặn.

2.1. Thiết kế bộ điều khiển

Định nghĩa sai số bám như sau:

$$e = \eta_d - \eta \quad (11)$$

$$\dot{\eta}_r = \dot{\eta} + r \quad (12)$$

Suy ra:

$$\ddot{\eta}_r = \ddot{\eta} + \ddot{r} \quad (13)$$

Trong đó η_d là quỹ đạo mong muốn, r là sai số đã được lọc được định nghĩa:

$$r = \dot{e} + \lambda e \quad (14)$$

Tiếp theo ta có $\dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d + \lambda e$ và $\ddot{\eta}_r = \ddot{\eta}_d + \lambda \dot{e}$, $\lambda > 0$.

Giả thiết 4: Đặc tính đối xứng của phương trình động học tay máy thỏa mãn $r^T(\dot{M} - 2C)r = 0$.

Thay thế (12) và (13) vào (1), ta có:

$$\begin{aligned} \tau &= M(\eta)\ddot{\eta} + C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} + G(\eta) \\ &= M(\eta)\ddot{\eta}_r + C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_r + G(\eta) - M(\eta)\dot{r} - C(\eta, \dot{\eta})r \end{aligned} \quad (15)$$

$$= \left[W_M^T S_M(\eta) \right] \ddot{\eta}_r + \left[W_C^T S_C(z) \right] \dot{\eta}_r + \left[W_G^T S_G(\eta) \right] - M(\eta) \dot{r} - C(\eta, \dot{\eta}) r + \varepsilon$$

Đối với hệ (1) bộ điều khiển được thiết kế theo [11]:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_m + K_p r + K_i \int r dt + \tau_r \\ &= \hat{M}_{NN}(\eta) \ddot{\eta}_r + \hat{C}_{NN}(\eta, \dot{\eta}) \dot{\eta}_r + \hat{G}_{NN}(\eta) + K_p r + K_i \int r dt + \tau_r \\ &= \left[\hat{W}_M^T S_M(\eta) \right] \ddot{\eta}_r + \left[\hat{W}_C^T S_C(z) \right] \dot{\eta}_r + \left[\hat{W}_G^T S_G(\eta) \right] + K_p r + K_i \int r dt + \tau_r \end{aligned} \quad (16)$$

Trong đó $K_p > 0, K_i > 0$.

Thành phần luật điều khiển của xấp xỉ các thành phần bất định mô hình được thiết kế như sau:

$$\tau_m = \hat{M}_{NN}(\eta) \ddot{\eta}_r + \hat{C}_{NN}(\eta, \dot{\eta}) \dot{\eta}_r + \hat{G}_{NN}(\eta) \quad (17)$$

Thành phần luật điều khiển bền vững được thiết kế:

$$\tau_r = K_r \operatorname{sgn}(r) \quad (18)$$

Trong đó $K_r = \operatorname{diag}[k_{rii}], k_{rii} > |\varepsilon_i|$.

Từ (15) và (16), ta có:

$$\begin{aligned} M(\eta) \dot{r} + C(\eta, \dot{\eta}) r + K_p r + K_i \int_0^t r dt + \tau_r &= \left[\tilde{W}_M^T S_M(\eta) \right] \ddot{\eta}_r \\ &+ \left[\tilde{W}_C^T S_C(z) \right] \dot{\eta}_r + \left[\tilde{W}_G^T S_G(\eta) \right] + \varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó: $\tilde{W}_M = W_M - \hat{W}_M, \tilde{W}_C = W_C - \hat{W}_C$ và $\tilde{W}_G = W_G - \hat{W}_G$.

Công thức (19) có thể viết được như sau:

$$\begin{aligned} M(\eta) \dot{r} + C(\eta, \dot{\eta}) r + K_i \int_0^t r dt &= -K_p r - K_r \operatorname{sgn}(r) \\ &+ \left[\tilde{W}_M^T S_M(\eta) \right] \ddot{\eta}_r + \left[\tilde{W}_C^T S_C(z) \right] \dot{\eta}_r + \left[\tilde{W}_G^T S_G(\eta) \right] + \varepsilon \end{aligned} \quad (20)$$

Luật cập nhật thích nghi của trọng số mạng nơ-ron được thiết kế theo [11]:

$$\dot{\hat{W}}_{Mi} = \Gamma_{Mi} \phi_{Mi}(\eta) \ddot{\eta}_r r_i \quad (21)$$

$$\dot{\hat{W}}_{Ci} = \Gamma_{Ci} \phi_{Ci}(z) \dot{\eta}_r r_i \quad (22)$$

$$\dot{\hat{W}}_{Gi} = \Gamma_{Gi} \phi_{Gi}(\eta) r_i \quad (23)$$

Trong đó $i = 1, 2, \dots, n$.

2.2. Phân tích tính ổn định của hệ kín

Chọn hàm ứng viên Lyapunov như sau:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} \left(\int_0^t r dt \right)^T K_i \left(\int_0^t r dt \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \Gamma_{Mi}^{-1} \tilde{W}_{Mi} \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \Gamma_{Ci}^{-1} \tilde{W}_{Ci} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Gi}^T \Gamma_{Gi}^{-1} \tilde{W}_{Gi} \end{aligned} \quad (24)$$

Trong đó $\Gamma_{Mi}, \Gamma_{Ci}, \Gamma_{Gi}$ là những ma trận hệ số đối xứng xác định dương.

Đạo hàm V theo thời gian ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} = r^T & \left[M\dot{r} + \frac{1}{2}\dot{M}r + K_i \int_0^t r dt \right] + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \Gamma_{Mi}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Mi} + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \Gamma_{Ci}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Ci} \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_G^T \Gamma_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Gi} \end{aligned} \quad (25)$$

Sử dụng Giả thiết 4 cho (25) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} = r^T & \left[M\dot{r} + Cr + K_i \int_0^t r dt \right] + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \Gamma_{Mi}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Mi} + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \Gamma_{Ci}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Ci} \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_G^T \Gamma_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Gi} \end{aligned} \quad (26)$$

Thay thế công thức (20) vào biểu thức (26):

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -r^T K_p r - r^T K_r \operatorname{sgn}(r) + r^T [\tilde{W}_M^T S_M] \ddot{\eta}_r + r^T [\tilde{W}_C^T S_C] \dot{\eta}_r \\ & + r^T [\tilde{W}_G^T S_G] + r^T \varepsilon + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \Gamma_{Mi}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Mi} + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \Gamma_{Ci}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Ci} \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_G^T \Gamma_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Gi} \end{aligned} \quad (27)$$

Biến đổi biểu thức sau:

$$\begin{aligned} r^T [\tilde{W}_M^T S_M] \ddot{\eta}_r &= \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \dots & r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{W}_{M1}^T \phi_{M1} \ddot{\eta}_r \\ \tilde{W}_{M2}^T \phi_{M2} \ddot{\eta}_r \\ \dots \\ \tilde{W}_{Mn}^T \phi_{Mn} \ddot{\eta}_r \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \phi_{Mi} \ddot{\eta}_r r_i \\ r^T [\tilde{W}_C^T S_C] \dot{\eta}_r &= \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \phi_{Ci} \dot{\eta}_r r_i \\ r^T [\tilde{W}_G^T S_G] &= \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Gi}^T \phi_{Gi} r_i \end{aligned}$$

Do đó (27) được biến đổi như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -r^T K_p r - r^T K_r \operatorname{sgn}(r) + r^T \varepsilon + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \phi_{Mi} \ddot{\eta}_r r_i + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \phi_{Ci} \dot{\eta}_r r_i \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Gi}^T \phi_{Gi} r_i + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Mi}^T \Gamma_{Mi}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Mi} + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_{Ci}^T \Gamma_{Ci}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Ci} + \sum_{i=1}^n \tilde{W}_G^T \Gamma_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_{Gi} \end{aligned} \quad (28)$$

Có biểu thức sau:

$$\dot{\tilde{W}}_{Mi} = -\dot{\tilde{W}}_{Mi}, \dot{\tilde{W}}_{Ci} = -\dot{\tilde{W}}_{Ci}, \dot{\tilde{W}}_{Gi} = -\dot{\tilde{W}}_{Gi}$$

Thay thế luật cập nhật thích nghi (21)-(23) cùng với điều kiện $k_{rii} > |\varepsilon_i|$ vào biểu thức (28) ta được:

$$\dot{V} = -r^T K_p r - r^T K_r \operatorname{sgn}(r) + r^T \varepsilon \leq -r^T K_p r \leq 0 \quad (29)$$

Do vậy:

$$\lambda_{\min}(K_p) \int_0^t r^T r \leq \int_0^t r^T K_p r \leq V(0) \quad (30)$$

Trong đó $\lambda_{\min}(K_p)$ là giá trị trị riêng nhỏ nhất của K_p . Vì $V(0)$ và $\lambda_{\min}(K_p)$ là những số dương chỉ ra rằng $r \in L_2^n$. Do đó $e \in L_2^n \cap L_\infty^n$, e là liên tục, $e \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ và $\dot{e} \in L_2^n$. Hơn nữa vì $\dot{V} \leq -r^T K_p r \leq 0$, nó chỉ ra rằng $0 \leq V \leq V(0), \forall t \geq 0$. Hơn nữa $V(t) \in L_\infty$ cho thấy rằng $\int_0^t r^T dt, \tilde{W}_M, \tilde{W}_C, \tilde{W}_G$ bị chặn nghĩa là $\hat{W}_M, \hat{W}_C, \hat{W}_G$ cũng bị chặn.

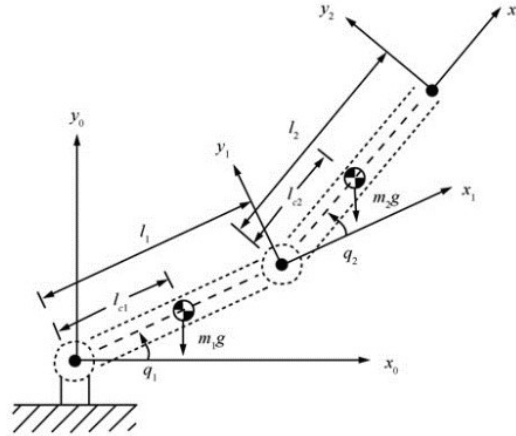
Từ các Giả thiết 1 đến Giả thiết 3 ta có $e \in L_2^n \cap L_\infty^n, \dot{e} \in L_2^n$ và $\dot{\eta}_d, \ddot{\eta}_d \in L_\infty^n$ có thể kết luận rằng $\dot{\eta}_r \in L_\infty^n, \ddot{\eta}_r \in L_\infty^n$. Bằng cách quan sát $r \in L_2^n$ và từ $\eta_d, \tau_r \in L_\infty^n$ có thể kết luận rằng $\dot{r} \in L_\infty^n$ từ biểu thức (20) và $\tau \in L_\infty^n$ từ biểu thức (16).

Sử dụng các kết luận $r \in L_2^n$ và $\dot{r} \in L_\infty^n$ để $r \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Hiển nhiên $\dot{e} \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Định lý được chứng minh.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG THUẬT TOÁN TRÊN MATLAB-SIMULINK

3.1. Tham số mô phỏng

Tiến hành mô phỏng trên Rô-bốt tay máy với 2 cánh tay liên kết (two-link) như sau:



Hình 1. Mô hình rô-bốt hai cánh tay liên kết

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

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

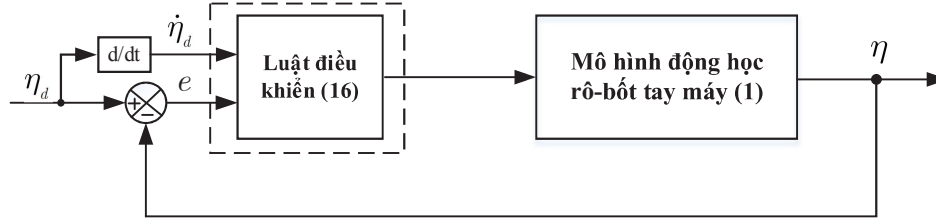
$$G(\eta) = \begin{bmatrix} p_4 g \cos q_1 + p_5 g \cos q_1 + q_2 \\ p_5 g \cos q_1 + q_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{Chọn } p = [2.9 \quad 0.76 \quad 0.87 \quad 3.04 \quad 0.87]^T, \eta(0) = [0.09 \quad -0.09]^T, \dot{\eta}(0) = [0.0 \quad 0.0]^T$$

$$\text{Quỹ đạo bám mong muốn của cánh tay thứ nhất và thứ hai là } \eta_d = [0.5 \sin(\pi t) \quad \sin(\pi t)]$$

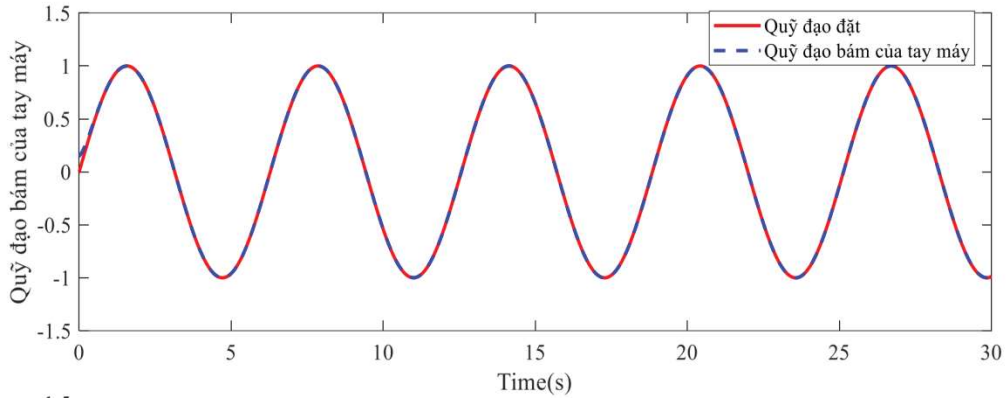
$$\text{Chọn các tham số của các bộ điều khiển được chọn } K_p = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, K_i = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$K_r = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} 5.0 & 0 \\ 0 & 5.0 \end{bmatrix}$. Phần tử của các ma trận hệ số trong luật cập nhật thích nghi của các trọng số mạng nơ-ron trong các công thức (21)-(23) là $\Gamma_{Mi} = 5, \Gamma_{Ci} = 10, \Gamma_{Gi} = 5$. Mạng RBF để ước tính $M(\eta), C(\eta, \dot{\eta}), G(\eta)$ có thông số các hàm Gaussian được thiết kế μ_i và ς_i như sau $[-1.5 \quad -1.0 \quad -0.5 \quad 0 \quad 0.5 \quad 1.0 \quad 1.5]$ và 10. Giá trị ban đầu của trọng số mạng được chọn là 0.

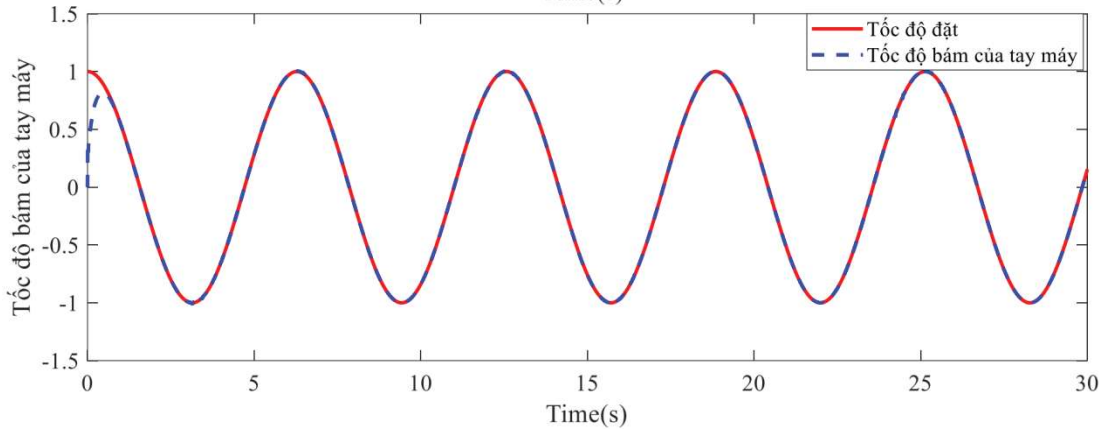


Hình 2. Cấu trúc điều khiển của hệ thống

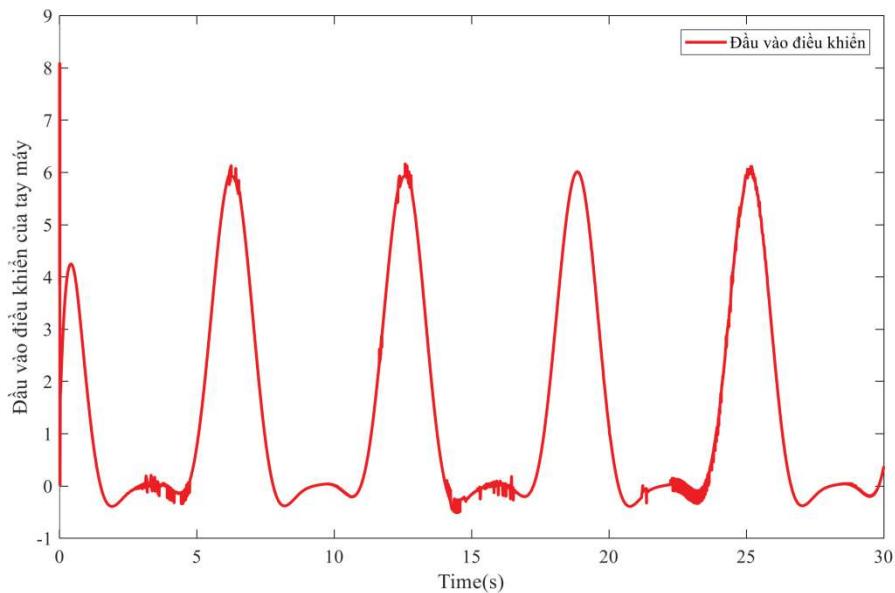
3.2. Kết quả mô phỏng



Hình 3. Đáp ứng quỹ đạo đặt của rô-bốt tay máy



Hình 4. Đáp ứng tốc độ đặt của rô-bốt tay máy



Hình 5. Đầu vào điều khiển của rô-bốt tay máy

Nhận xét:

Trong kết quả mô phỏng của thuật toán, đáp ứng đầu ra của rô-bốt tay máy hai liên kết có chất lượng tốt, bám quỹ đạo đặt với sai số nhỏ trong thời gian quá độ thấp thể hiện trên Hình 3, Hình 4. Đầu vào điều khiển của hệ thống bao đầu dao động lớn do hệ đang quá độ, khi hệ xác lập dao động trong khoảng $-1[N][N.m] \div 7[N][N.m]$, chứng tỏ mạng nơ-ron thiết kế ước lượng gần đúng, các hàm bất định có trong mô hình động học của tay máy. Như vậy thuật toán điều khiển hoàn toàn đáp ứng yêu cầu điều khiển bám quỹ đạo của tay máy.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này sử dụng kết quả nghiên cứu của công trình [11] để phát triển bộ điều khiển mới dựa trên luật điều khiển bền vững và luật điều khiển xấp xỉ dùng mạng nơ-ron ước tính các hàm bất định có trong mô hình. Sự ổn định của hệ thống với thuật toán đề xuất với các giải pháp của vấn đề điều khiển bám quỹ đạo được thành lập. Bài báo này cũng trình bày lý thuyết chứng minh sự hội tụ của các trọng số mạng nơ-ron. Kết quả mô phỏng đã đánh giá tốt kết quả đạt được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. K. Dupree, P. M. Patre, Z. D. Wilcox, and W. E. Dixon (2011), "Asymptotic optimal control of uncertain nonlinear EulerLagrange systems," *Automatica*, vol. 47, no. 1, pp. 99–107.
2. S. Mondal and C. Mahanta (2014), "Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 4, pp. 2356–2377.
3. W. He, C. Xue, X. Yu, Z. Li, and C. Yang (2020), "Admittance-Based Controller Design for Physical Human-Robot Interaction in the Constrained Task Space," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 1937–1949.
4. X. Yu, W. He, H. Li, and J. Sun (2020), "Adaptive Fuzzy Full-State and Output-Feedback Control for Uncertain Robots With Output Constraint," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 11, pp. 6994–7007.

5. W. He, Y. Chen, and Z. Yin (2016), “*Adaptive Neural Network Control of an Uncertain Robot with Full-State Constraints*,” IEEE Trans. Cybern., vol. 46, no. 3, pp. 620–629.
6. W. He and Y. Dong (2018), “*Adaptive Fuzzy Neural Network Control for a Constrained Robot Using Impedance Learning*,” IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 29, no. 4, pp. 1174–1186.
7. W. He, Y. Dong, and C. Sun (2016), “*Adaptive Neural Impedance Control of a Robotic Manipulator with Input Saturation*,” IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst., vol. 46, no. 3, pp. 334–344.
8. Z. Sun, Y. Xia, L. Dai, K. Liu, and D. Ma (2017), “*Disturbance rejection MPC for tracking of wheeled mobile robot*,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 22, no. 6, pp. 2576–2587.
9. Y. Yu, L. Dai, Z. Sun, and Y. Xia (2018), “*Robust Nonlinear Model Predictive Control for Robot Manipulators with Disturbances*,” in Chinese Control Conference, CCC, vol. 2018-July, pp. 3629–3633.
10. H. Yang, M. Guo, Y. Xia, and Z. Sun (2020), “*Dual closed-loop tracking control for wheeled mobile robots via active disturbance rejection control and model predictive control*,” Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 30, no. 1, pp. 80–99.
11. A. Alessandri (2004), “*Adaptive neural network control of robotic manipulators*,” Automatica, vol. 40, no. 11, pp. 2011–2012.