

THIẾT KẾ VÀ THỰC HIỆN BỘ ĐIỀU KHIỂN HỆ TAY MÁY

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A CONTROLLER FOR MANIPULATOR

PHẠM THÀNH LUÂN^{1a}, PHẠM THANH TÙNG¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

+ Tác giả liên hệ: ^aEmail: phamluan074170281@gmail.com

Nhận bài (Received): 04/01/2023; Phản biện (Reviewed): 16/01/2023; Chấp nhận (Accepted): 02/3/2023

TÓM TẮT

Bộ điều khiển trượt thích nghi dựa vào mạng nơ-ron RBF được thiết kế và thực hiện trong bài báo này. Bộ điều khiển đề xuất được áp dụng cho tay máy 2 bậc tự do mà đã được triển khai trong các ngành sản xuất vật liệu xây dựng, luyện kim, chế tạo cơ khí và công nghiệp đóng tàu. Bộ điều khiển trượt thích nghi dựa vào mạng nơ-ron RBF được thiết kế để đảm bảo vị trí các khớp của tay máy bám theo vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn. 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 của bộ điều khiển đề xuất với thời gian tăng, thời gian xác lập, độ vọt lố, sai số xác lập của link 1 lần lượt là 0.7708(s), 1.4254(s), 0.0559(%), 0(rad) và của link 2 là 0.9253(s), 1.5655(s), 0.1138(%), 0(rad).

Từ khóa: hệ tay máy, điều khiển trượt, mạng RBF, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

An adaptive sliding mode control (SMC) based on radial basis function neural network (RBFNN) is designed and implemented in this paper. The proposed controller is applied to a 2-degree-of-freedom manipulator that has been deployed in the construction materials manufacturing, metallurgy, mechanical engineering and shipbuilding industries. The adaptive SMC based on RBFNN is used to ensure the manipulator's actual position follows the desired in a finite time. The stability of the system is proven by Lyapunov theory. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed controller with the rising time, the settling time, the percent overshoot, the steady state error of link 1 are 0.7708(s), 1.4254(s), 0.0559(%), 0(rad) and link 2 are 0.9253(s), 1.5655(s), 0.1138(%), 0(rad), respectively.

Keywords: manipulator, sliding mode control, RBF neural network, MATLAB/Simulink

1. Giới thiệu

Tay máy robot đã được triển khai trong các ngành sản xuất vật liệu xây dựng, luyện kim, chế tạo cơ khí, công nghiệp đóng tàu và một vài lĩnh vực khác với ưu điểm độ chính xác cao, thao tác lặp lại liên tục, tiêu

tốn ít năng lượng và làm việc trong những môi trường khắc nghiệt [1]. Một yêu cầu quan trọng trong điều khiển tay máy là điều khiển chúng bám theo quỹ đạo mong muốn. Trong quá trình vận hành, các thông số của tay máy có thể bị thay đổi dưới tác

động của các yếu tố như tải trọng và nhiễu, dẫn tới khả năng mất ổn định hoặc mất kiểm soát. Với ưu điểm về tính ổn định và bền vững ngay cả khi hệ thống có nhiễu hoặc khi thông số của đối tượng thay đổi, bộ điều khiển trượt là một lựa chọn tiêu biểu trong điều khiển tay máy. Tuy nhiên, khi biên độ của luật điều khiển thay đổi lớn và với tác động của hàm dấu, tín hiệu điều khiển có thể bị dao động (chattering), kém ổn định và tác động xấu đến các bộ drivers [2].

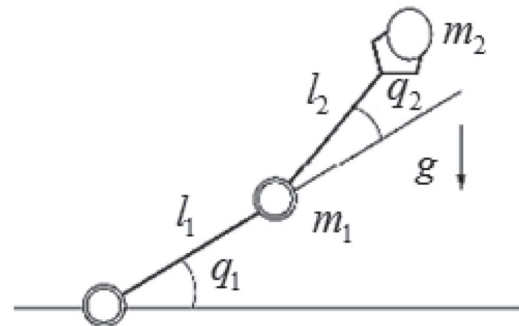
Để khắc phục nhược điểm của bộ điều khiển trượt, nhiều nhà khoa học đã nghiên cứu và đề xuất kết hợp kỹ thuật điều khiển trượt với bộ điều khiển mờ [4], đặc biệt là kết hợp với bộ điều khiển sử dụng mạng nơ-ron [4]. Tuy nhiên, bộ điều khiển sử dụng mạng nơ-ron với thiết kế cố định vẫn chưa đủ linh hoạt, trong nhiều trường hợp vẫn chưa đáp ứng được quá trình điều khiển tay máy. Vì vậy, kỹ thuật điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF cho tay máy đã được một số nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và công bố. Chẳng hạn như: điều khiển trượt thích nghi dựa vào mạng nơ-ron RBF hệ Quadrotor [5], hệ thống servo điện-thủy lực [6], robot di động đa hướng [7], hệ thống 2 bồn tương tác [8], cần cầu trên cao 2D không chắc chắn [9], hệ thống bóng và tấm nền [10], bộ lọc công suất tích cực [11], nhiễu loạn phụ thuộc thời gian và sự không chắc chắn [12], phương tiện bay siêu thanh [13].

Nghiên cứu này đề xuất và kiểm chứng bộ điều khiển trượt thích nghi dựa vào mạng nơ-ron RBF áp dụng cho tay máy 2 bậc tự do để đảm bảo vị trí các khớp của tay máy bám theo vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn. Mạng nơ-ron RBF được huấn luyện trực tuyến bằng giải thuật Gradient Descent và được xem như bộ điều khiển thích nghi.

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần: mô hình toán học của tay máy được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày các bước thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi mạng RBF, các kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày trong phần 4 và phần 5 là kết luận.

2. Mô hình toán học của tay máy

Mô hình hệ tay máy 2 bậc tự do [14-15] như Hình 1.



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

Phương trình động học được mô tả như (1):

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

với

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

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

$F(\dot{q}) = 0.02 \text{sign}(\dot{q})$ là lực ma sát,

$\tau_d = [0.2 \sin t \quad 0.2 \sin t]^T$ là nhiễu chưa biết,

$q = [q_1 \quad q_2]^T$ là vector góc, $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$

là ngõ vào điều khiển.

Phương trình động học tay máy được đặc trưng bởi các tính chất sau [14]:

- Tính chất 1: $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ là ma trận đối xứng, giới hạn, ma trận quán tính xác định dương, cho biết hằng số cố định m_1 và m_2 , thì tồn tại $m_1\mathbf{I} \leq \mathbf{H}(\mathbf{q}) \leq m_2\mathbf{I}$

- Tính chất 2: Sử dụng một định nghĩa đúng về ma trận $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, cả 2 ma trận $\mathbf{H}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là không độc lập và thỏa mãn (2):

$$\mathbf{x}^T (\dot{\mathbf{H}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

với $\mathbf{x}^T (\dot{\mathbf{H}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{x} = 0$ là ma trận đối xứng nghịch đảo.

Tính chất này chỉ đơn giản được gọi là lực lý tưởng được định nghĩa bởi $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$, không hoạt động trên hệ thống. Tính chất này được sử dụng trong phân tích độ ổn định.

- Tính chất 3: $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là giới hạn, điều đó có nghĩa là $\mathbf{C}_b(\mathbf{q})$, thì tồn tại $\|\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\| \leq \mathbf{C}_b(\mathbf{q})\|\dot{\mathbf{q}}\|$

- Tính chất 4: Đối với nhiều chưa biết τ_d , $\|\tau_d\| \leq \tau_m$, τ_m là một hằng số tích cực.

3. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi mạng RBF

3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Sai số bám được định nghĩa như (3) [14]:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t) \quad (3)$$

Trong đó, $\mathbf{q}_d(t)$ là vị trí mong muốn, $\mathbf{q}(t)$ là vị trí thực tế của tay máy.

Mặt trượt được định nghĩa như (4):

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{e} \quad (4)$$

trong đó $\mathbf{\Gamma}$ là ma trận hằng số xác định dương đối xứng và $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}^T > 0$, do đó ta có:

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{s} + \dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\mathbf{e} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{H}(\ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{e}}) = \mathbf{H}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{e}}) - \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{H}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} + \mathbf{F} + \boldsymbol{\tau}_d - \boldsymbol{\tau} \\ &= \mathbf{H}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{e}}) - \mathbf{C}\mathbf{s} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\mathbf{e}) + \mathbf{G} + \mathbf{F} + \boldsymbol{\tau}_d - \boldsymbol{\tau} \\ &= -\mathbf{C}\mathbf{s} - \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} + \boldsymbol{\tau}_d \end{aligned} \quad (6)$$

trong đó

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma}\mathbf{e}) + \mathbf{G} + \mathbf{F}.$$

Trong kỹ thuật, $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ vẫn chưa được biết và do đó, cần phải xấp xỉ $\mathbf{f}(\mathbf{x})$. Mạng RBF được thực hiện để xấp xỉ $\mathbf{f}(\mathbf{x})$. Ngõ vào của mạng được chọn dựa trên biểu thức của $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ như (7):

$$\mathbf{x} = [\mathbf{e}^T \quad \dot{\mathbf{e}}^T \quad \mathbf{q}_d^T \quad \dot{\mathbf{q}}_d^T \quad \ddot{\mathbf{q}}_d^T] \quad (7)$$

Bộ điều khiển được thiết kế như (8):

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \mathbf{K}_V \mathbf{s} \quad (8)$$

trong đó là \mathbf{K}_V là ma trận hằng số xác định dương đối xứng, $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$ là ngõ ra của mạng RBF. $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$ là xấp xỉ của $\mathbf{f}(\mathbf{x})$.

Từ phương trình (8) và (6), ta có (9):

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\dot{\mathbf{s}} &= -\mathbf{C}\mathbf{s} - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) - \mathbf{K}_V \mathbf{s} + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\tau}_d \\ &= (\mathbf{K}_V + \mathbf{C})\mathbf{s} + \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\tau}_d \\ &= -(\mathbf{K}_V + \mathbf{C})\mathbf{s} + \boldsymbol{\zeta}_0 \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó

$$\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\zeta}_0 = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\tau}_d.$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (10):

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{H} \mathbf{s} \quad (10)$$

Thế (9) vào đạo hàm của (10), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{H}} \mathbf{s} \\ &= -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{H}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{s} + \mathbf{s}^T \boldsymbol{\zeta}_0 \\ &= \mathbf{s}^T \boldsymbol{\zeta}_0 - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} \end{aligned} \quad (11)$$

Phương trình (11) chỉ ra rằng, với \mathbf{K}_V , sự ổn định của hệ thống điều khiển phụ

thuộc vào ζ_0 , tức là phụ thuộc vào độ chính xác xấp xỉ và biên độ của τ_d .

Mạng RBF có thể được thực hiện để xấp xỉ $\hat{f}(x)$. Thuật toán mong muốn của mạng RBF là:

$$\phi_i = g\left(\|x - c_i\|^2 / \sigma_i^2\right), i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$y = W^{*T} \varphi(x), f(x) = W^{*T} \varphi(x) + \varepsilon$$

trong đó là x trạng thái đầu vào của mạng, $\varphi(x) = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n]^T$, ε sai số xấp xỉ của mạng nơ-ron, là W^* vector trọng số của mong muốn mạng RBF.

Ngõ ra của mạng RBF là:

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \varphi(x) \quad (13)$$

Ta chọn: $\tilde{W} = W^* - \hat{W}, \|\tilde{W}\|_F \leq W_{\max}$

Do đó, ta có

$$\zeta_0 = \tilde{f}(x) + \tau_d = \tilde{W}^T \varphi(x) + \varepsilon + \tau_d \quad (14)$$

Bộ điều khiển được thiết kế như (15):

$$\tau = \hat{f}(x) + K_v s - v \quad (15)$$

với v là yếu tố bền vững cần thiết để khắc phục sai số xấp xỉ ε của mạng và nhiễu τ_d .

Từ phương trình. (15) và (6) ta có (16):

$$\begin{aligned} Hs &= -(K_v + C)s + \tilde{W}^T \varphi(x) + (\varepsilon + \tau_d) + v \\ &= -(K_v + C)s + \zeta_1 \end{aligned} \quad (16)$$

trong đó $\zeta_1 = \tilde{W}^T \varphi(x) + (\varepsilon + \tau_d) + v$.

Thành phần bền vững v được thiết kế như (17):

$$v = -(\varepsilon_N + b_d) \text{sign}(s) \quad (17)$$

trong đó $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_N, \|\tau_d\| \leq b_d$.

3.2. Phân tích ổn định

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (18):

$$V = \frac{1}{2} s^T Hs + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T F_w^{-1} \tilde{W}) \quad (18)$$

Trong đó H và F_w là các ma trận dương.

Do đó, ta có:

$$\dot{V} = s^T H\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{H}s + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T F_w^{-1} \dot{\tilde{W}}) \quad (19)$$

Từ phương trình (16), ta có (20)

$$\dot{V} = -s^T K_v s + \frac{1}{2} s^T (\dot{H} - 2C)s + \text{tr} \tilde{W}^T (F_w^{-1} \dot{\tilde{W}} + \varphi s^T) + s^T (\varepsilon + \tau_d + v) \quad (20)$$

Do tay máy có đặc tính là $s^T (\dot{H} - 2C)s = 0$. Chọn $\dot{\tilde{W}} = -F_w \varphi s^T$, nghĩa là luật thích nghi của mạng như (21):

$$\dot{\tilde{W}} = F_w \varphi s^T \quad (21)$$

Do đó, ta có (22):

$$\dot{V} = -s^T K_v s + s^T (\varepsilon + \tau_d + v) \quad (22)$$

Vì

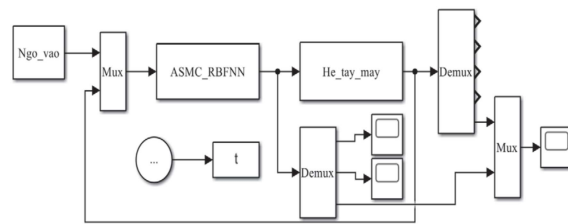
$$\begin{aligned} s^T (\varepsilon + \tau_d + v) &= s^T (\varepsilon + \tau_d) + s^T v \\ &= s^T (\varepsilon + \tau_d) - \|s\| (\varepsilon_N + b_d) \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Nên ta có (24)

$$\dot{V} \leq 0 \quad (24)$$

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất trong MATLAB/Simulink như Hình 2.



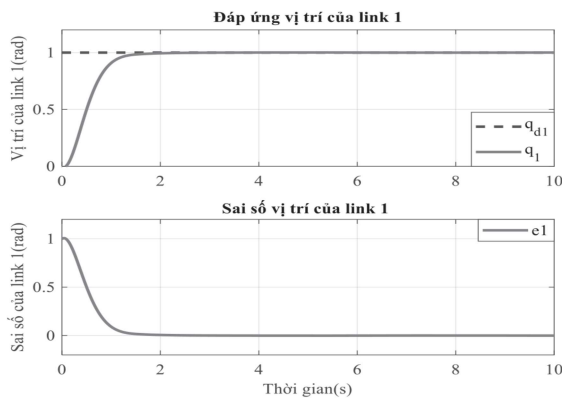
Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất trong MATLAB/Simulink

Các thông số được sử dụng trong mô phỏng như sau [14]: $K_v = \text{diag}\{20, 20\}$, $F_w = \text{diag}\{15, 15\}$, $p = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5] = [2.9 \ 0.76 \ 0.87 \ 3.04 \ 0.87]$, $b = 0.2$,

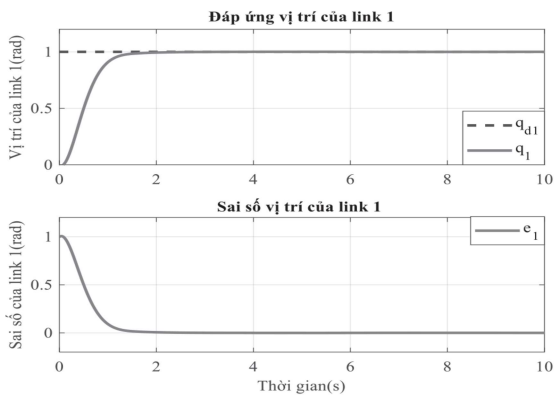
$\Gamma = diag\{5,5\}$, $\varepsilon_N = 0.2$, $b_d = 0.1$, số nơ-ron ở lớp ẩn của mạng RBF là 7 nơ-ron và

$$c = 0.1 \times \begin{bmatrix} -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \end{bmatrix}$$

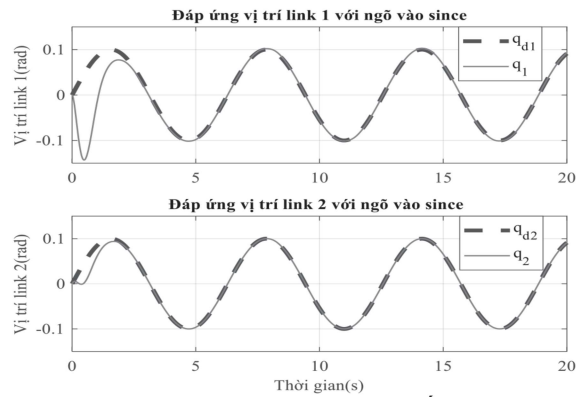
Đáp ứng vị trí và sai số của link 1 và 2 với ngõ vào $q_{d1} = q_{d2} = 1(rad)$ được trình bày như Hình 3 và Hình 4. Kết quả từ Hình 3 và Hình 4 cho thấy rằng vị trí thực tế của link 1 (q_1) và 2 (q_2) tiến về vị trí mong muốn q_{d1} và q_{d2} trong thời gian hữu hạn với thời gian tăng, thời gian xác lập, độ vọt lố, sai số xác lập của link 1 lần lượt là 0.7708(s), 1.4254(s), 0.0559(%), 0(rad) và của link 2 là 0.9253(s), 1.5655(s), 0.1138(%), 0(rad). Các chỉ tiêu này được trình bày ở Bảng 1.



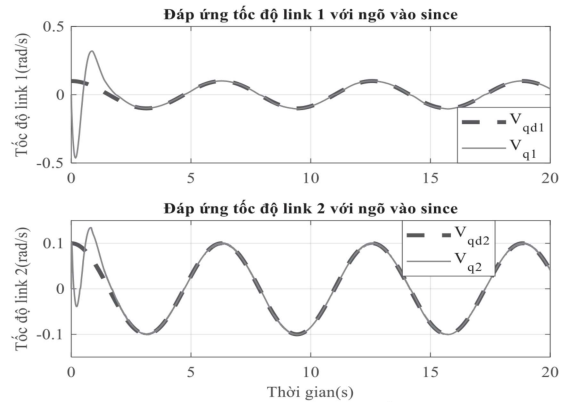
Hình 3. Đáp ứng vị trí và sai số của link 1



Hình 4. Đáp ứng vị trí và sai số của link 2



Hình 5. Đáp ứng vị trí và sai số của link 1 với ngõ vào sine



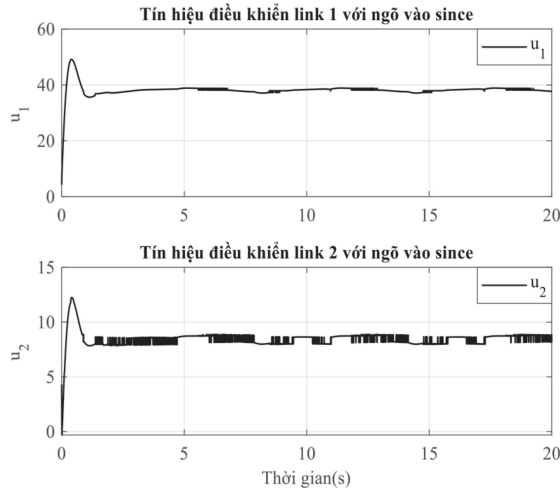
Hình 6. Đáp ứng vị trí và sai số của link 2 với ngõ vào sine

Bảng 1. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển đề xuất

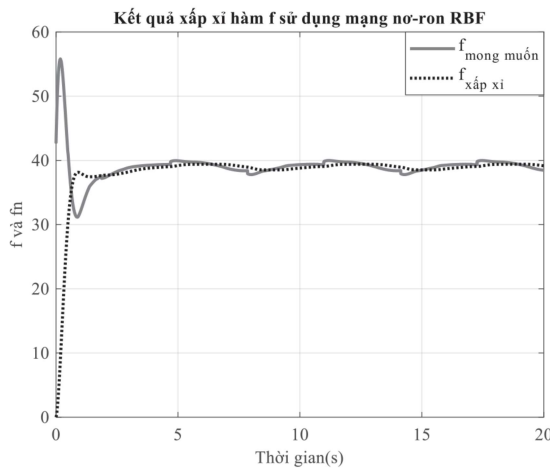
Chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập (rad)
q_1	0.7708	1.4254	0.0559	0
q_2	0.9253	1.5655	0.1138	0

Đáp ứng vị trí và sai số của link 1 và 2 với ngõ vào $q_{d1} = q_{d2} = 0.1 \sin t(rad)$ được trình bày như Hình 5. Vị trí thực tế của link 1 và 2 vẫn hội tụ về vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn với sai số hội tụ về 0. Hình 6 trình bày tốc độ bám vị trí của tay máy. Tốc độ thực tế của link 1 và 2 vẫn hội tụ về vị trí mong muốn. Các kết quả này chứng tỏ bộ điều khiển đề xuất phù hợp với ứng dụng điều khiển bám vị trí hệ tay máy.

Tín hiệu điều khiển link 1 và 2 với ngõ vào sine vào được trình bày như Hình 7. Các tín hiệu này phù hợp để điều khiển vị trí của hệ tay máy đạt được vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn.



Hình 7. Tín hiệu điều khiển link 1 và 2 với ngõ vào sine



Hình 8. Kết quả xấp xỉ hàm $f(x)$ sử dụng mạng nơ-ron RBF

Hình 8 trình bày kết quả xấp xỉ hàm $f(x)$ trong luật điều khiển (15). Mạng nơ-ron RBF đã xấp xỉ hiệu quả hàm $f(x)$ với sai số xấp xỉ hội tụ về 0. Nó góp phần tạo nên bộ điều khiển phù hợp cho hệ tay máy.

Từ các kết quả đạt được thông qua mô phỏng trong MATLAB/Simulink đã chứng minh sự phù hợp và hiệu quả trong điều khiển bám vị trí hệ tay máy 2 bậc tự do.

5. Kết luận

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi dựa vào mạng nơ-ron RBF áp dụng cho tay máy 2 bậc tự do. Tính ổn định của hệ thống đã được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Mạng nơ-ron RBF đã chứng tỏ hiệu quả trong xấp xỉ hàm $f(x)$ trong luật điều khiển đề xuất với các trọng số của mạng được cập nhật trực tuyến bằng giải thuật Gradient Descent. Các kết quả mô phỏng trong MATLAB/Simulink với ngõ vào $1(rad)$ và $0.1\sin t(rad)$ đã cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với thời gian tăng, thời gian xác lập, độ vọt lố, sai số xác lập của link 1 lần lượt là $0.7708(s)$, $1.4254(s)$, $0.0559(\%)$, $0(rad)$ và của link 2 là $0.9253(s)$, $1.5655(s)$, $0.1138(\%)$, $0(rad)$. Tuy nhiên, phương pháp điều khiển này vẫn còn xuất hiện độ vọt lố. Trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tiến hành thực hiện các giải thuật điều khiển tối ưu để cải thiện chất lượng điều khiển cho hệ tay máy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nasr M. Ghaleb and Ayman A. Aly. (2018). *Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm*. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, 6(11), 24-31.
- [2]. Hussein, U.S., Muhammed, B.M., Tahir, A.Z., Ahmed, T.S., Sadiq, T. & Ahmadu A.G.. (2018). *Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System*. International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST), 1 – 9.

- [3]. Diao, S., Sun, W., Wang, L. et al.. (2021). *Finite-Time Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Systems with Unknown Backlash-Like Hysteresis*. Int. J. Fuzzy System, 23(9), 1-11.
- [4]. Lee, H., D. Nam and C.H. Park. (2004). *A sliding mode controller using neural networks for robot manipulator*. Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks Bruges (Belgium), 28-30.
- [5]. W. K. Alqaisi, B. Brahmi, J. Ghommam, M. Saad and V. Nerguizian. (2019). *Adaptive Sliding Mode Control Based on RBF Neural Network Approximation for Quadrotor*. 2019 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE), 1-7.
- [6]. HaoFeng, QianyuSong, ShouleiMa, WeiMa, ChenboYin, DonghuiCao and HongfuYu. (2022). *A new adaptive sliding mode controller based on the RBF neural network for an electro-hydraulic servo system*. ISA Transactions, 129, 472-484.
- [7]. Phạm Thanh Tùng, Nguyễn Chí Ngôn, Lê Thị Kiều Mai, Vo Hoang Tam, Đồng Văn Hương, Nguyễn Ngô Phong. (2018). *Adaptive Sliding Mode Control with RBF Neural Networks for Omni-Directional Mobile Robot*. Journal of Technical Education Science, 49, 80-87.
- [8]. Pham Thanh Tung, Nguyen Chi Ngon. (2021). *Adaptive Sliding Mode Control Based on RBF Neural Network for Two Tanks Interacting System*. TNU Journal of Science and Technology, 226(11), 323 – 331.
- [9]. Hai Xuan Le, Thai Van Nguyen, Anh Viet Le, Tuan Anh Phan, Nam Hoai Nguyen, Minh Xuan Phan. (2019). *Adaptive hierarchical sliding mode control using neural network for uncertain 2D overhead crane*. International Journal of Dynamics and Control, 7(3), 996-1004.
- [10]. Jiang-Feng Li, Feng-Hong Xiang. (2021). *RBF Network Adaptive Sliding Mode Control of Ball and Plate System Based on Reaching Law*. Arabian Journal for Science and Engineering, 8, 9393-9404.
- [11]. Huiyue Zhang and Yunbo Liu. (2020). *Adaptive RBF neural network based on sliding mode controller for active power filter*. International Journal of Power Electronics, 11(4), 460-481.
- [12]. Shanta, Mst. Nafisa Tamanna and Zainul Azlan, Norsinnira. (2016). *Adaptive sliding mode control with radial basis function neural network for time dependent disturbances and uncertainties*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11(6), 4123-4129.
- [13]. Jianmin Wang, Jinbo Wang and Tao Zhang. (2016). *RBF neural network based adaptive sliding mode control for hypersonic flight vehicles*. 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 58-63.
- [14]. Jinkun Liu and Xinhua Wang. 2011. *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Springer.
- [15]. Nasr M. Ghaleb and Ayman A. Aly. (2018). *Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm*. Inter. J. of Emerging Engineering Research and Technology, 6(11), 8-23.