

## APPLICATION OF MINIMUM PARAMETER LEARNING METHOD AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR MANIPULATOR CONTROL

Nguyen Truong Ky, Pham Thanh Tung\*

Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<b>Received:</b> 06/6/2024	This research designs and implements a robust adaptive sliding mode control (RASMC) based on radial basis function neural network (RBFNN) with minimum parameter learning (MPL) method for a manipulator system. This is a system that has been deployed in the construction materials manufacturing, metallurgy, mechanical engineering and shipbuilding industries. The robust adaptive SMC based on RBFNN is used to ensure the manipulator's actual position following the desired in a finite time. The weight value parameters of the RBFNN are adjusted online by Quasi Newton algorithm according to adaptive laws for the purpose of controlling the output of the manipulator system to track a given trajectory. The minimum parameter learning (MPL) method is used in this study so that the system has only one online adaptive parameter, reduces the computational burden. 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 0.0747(s), 0.1376(s), 0.002 (%), 0(rad), and link 2 are 0.0844(s), 0.152(s), 0(%), 0(rad), respectively.
<b>Revised:</b> 07/10/2024	
<b>Published:</b> 08/10/2024	
<b>KEYWORDS</b>	
Manipulator system	
Artificial neural network	
Minimum parameter learning	
Sliding mode control	
MATLAB/Simulink	

## ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP HỌC THÔNG SỐ CỰC TIỂU VÀ MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO TRONG ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY

Nguyễn Trường Kỳ, Phạm Thanh Tùng\*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<b>Ngày nhận bài:</b> 06/6/2024	Nghiên cứu này thiết kế và thực hiện bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu cho hệ tay máy. Đây là hệ thống 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 bền vững 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. Các trọng số của mạng nơ-ron RBF được cập nhật trực tuyến bằng giải thuật Quasi Newton căn cứ theo các luật thích nghi bền vững nhằm mục đích điều khiển đầu ra của hệ tay máy bám theo một quỹ đạo nhất định. Phương pháp học thông số cực tiểu được sử dụng trong nghiên cứu này để hệ thống chỉ còn một thông số thích nghi trực tuyến, giảm gánh nặng tính toán. 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 quá điều chỉnh, sai số xác lập của thanh 1 lần lượt là 0,0747(s), 0,1376(s), 0,002 (%), 0(rad) và của thanh 2 là 0,0844(s), 0,152(s), 0(%), 0(rad).
<b>Ngày hoàn thiện:</b> 07/10/2024	
<b>Ngày đăng:</b> 08/10/2024	
<b>TỪ KHÓA</b>	
Hệ tay máy	
Mạng nơ-ron nhân tạo	
Học thông số cực tiểu	
Điều khiển trượt	
MATLAB/Simulink	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10548>

\* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Hệ tay máy là thành phần chính trong các ngành sản xuất với nhiều lý do như tốc độ, độ chính xác và khả năng lặp lại [1]. Hệ tay máy được sử dụng rộng rãi trong sản xuất ô tô, hàng không vũ trụ, lắp ráp điện tử, hoạt động y tế chính xác và các lĩnh vực khác [2]. Trong hệ tay máy, một trong những nhiệm vụ khó khăn nhất là thực hiện chuyển động nhanh và chính xác [1]. Do các đặc tính đặc biệt của hệ tay máy như khối lượng (kg) và chiều dài của liên kết (m); lực ma sát (N) và nhiều chưa biết, nên rất khó để thiết lập mô hình động lực học chính xác của hệ tay máy trong kỹ thuật thực tế [3]. Vì vậy, điều đặc biệt quan trọng là phải nghiên cứu các phương pháp điều khiển hệ tay máy bám theo quỹ đạo tham chiếu với đáp ứng nhanh, có độ chính xác cao và bền vững dưới tác động của các yếu tố như tải trọng, nhiễu và sự thay đổi của các thông số tay máy trong quá trình vận hành.

Gần đây, các nghiên cứu đã chỉ rõ nhiều yếu tố gây bất ổn và tác động trực tiếp lên động lực học của tay máy robot. 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 dẫu, tín hiệu điều khiển có thể bị dao động (chattering) và tác động xấu đến các bộ drivers.

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] - [7], giải thuật di truyền, đặc biệt là kết hợp với bộ điều khiển sử dụng mạng nơ-ron [8]. 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. Vì vậy, kỹ thuật điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF 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 [9], hệ thống servo điện-thủy lực [10], robot di động đa hướng [11], hệ thống 2 bôn tương tác [12], cần cầu trên cao 2D bất định [13], hệ thống bóng và tấm nền [14], bộ lọc công suất tích cực [15], nhiễu loạn phụ thuộc thời gian và sự không chắc chắn [16], phương tiện bay siêu thanh [17].

Nghiên cứu này đề xuất và kiểm chứng bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu cho hệ tay máy 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 đã được sử dụng rộng rãi để ước lượng các động lực học chưa biết [18]. Tuy nhiên, việc sử dụng bộ xấp xỉ RBF có thể giảm thiểu đáng kể các tác động tiêu cực do động lực học chưa biết gây ra, nhưng nó không chỉ làm tăng độ phức tạp tính toán của hệ thống mà còn làm giảm tốc độ hoạt động của thuật toán do cần phải tính toán lớn cho các trọng số đã xác định của các nút nơ-ron. Để khắc phục những hạn chế của RBF, phương pháp học thông số cực tiểu (MLP) đã được ứng dụng [19]. Bằng cách sử dụng kỹ thuật MLP, trọng số của các nút nơ-ron lớn sẽ được nén thành định mức của ma trận trọng số trong quá trình nhận dạng tham số. Do đó, độ phức tạp tính toán có thể giảm đi. Các trọng số của mạng nơ-ron RBF được cập nhật trực tuyến bằng giải thuật Quasi Newton căn cứ theo các luật thích nghi bền vững nhằm mục đích điều khiển đầu ra của hệ tay máy bám theo một quỹ đạo nhất định. Trong phương pháp Quasi Newton này, hướng tìm kiếm được tính toán dựa trên mô hình bậc hai của hàm mục tiêu, trong đó một số phép tính gần đúng thay thế Hessian thực ở mỗi lần lặp. Một số sơ đồ xấp xỉ Hessian với kỹ thuật tìm kiếm dòng thích hợp cung cấp độ chính xác bậc cao hơn trong việc tính gần đúng độ cong và làm cho các phương pháp hiệu quả hơn.

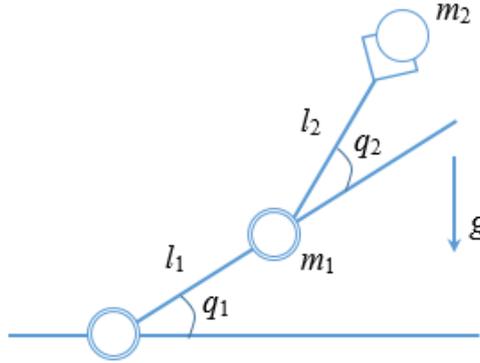
Bài báo được tổ chức gồm 4 phần: phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu cho hệ tay máy được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày các kết quả mô phỏng và đánh giá và phần 4 là kết luận.

## 2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu

### 2.1. Mô hình toán học hệ tay máy

Mô hình hệ tay máy 2 bậc tự do như Hình 1 [20]. Phương trình động học mô tả như (1):

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



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

với

$$D(q) = \begin{bmatrix} p_1 + p_2 + 2p_3 \cos q_2 & p_2 + p_3 \cos q_2 \\ p_2 + p_3 \cos q_2 & p_2 \end{bmatrix} \text{ là ma trận quán tính xác định dương}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -p_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -p_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ p_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix} \text{ là ma trận quán tính}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} p_4 g \cos q_1 + p_5 g \cos(q_1 + q_2) \\ p_5 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \text{ là vector quán tính}$$

trong đó,  $p_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$ ,  $p_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$ ,  $p_3 = m_2 l_1 l_{c1}$ ,  $p_4 = m_1 l_{c2} + m_2 l_1$ ,  $p_5 = m_2 l_{c2}$ ,  $l_{c1} = 0,5l_1$  và  $l_{c2} = 0,5l_2$ .

Các thông số của hệ tay máy như sau [20]:  $m_1 = 2(kg)$ ,  $m_2 = 0,85(kg)$ ,  $l_1 = 0,35(m)$ ,  $l_2 = 0,31(m)$ ,  $g = 9,81(m/s^2)$ ,  $I_1 = 61,25 \times 10^{-3}(kgm^2)$ ,  $I_2 = 20,42 \times 10^{-3}(kgm^2)$ ,  $F(\dot{q}) = 0,02 \text{sign}(\dot{q})$  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 đầu vào điều khiển.

### 2.2. Thiết kế bộ điều khiển

$$\text{Sai số bám được định nghĩa như (2): } e = q_d - q \quad (2)$$

trong đó,  $q_d$  là vị trí mong muốn,  $q$  là vị trí thực tế của tay máy.

Mục tiêu điều khiển là  $e \rightarrow 0$  và  $\dot{e} \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ .

$$\text{Định nghĩa mặt trượt như (3): } s = \dot{e} + \beta e \quad (3)$$

trong đó  $\beta = \beta^T > 0$ , sau đó:  $\dot{q} = -s + \dot{q}_d + \beta e$

$$\begin{aligned} D\dot{s} &= D(\ddot{q}_d - \ddot{q} + \beta\dot{e}) = D(\ddot{q}_d + \beta\dot{e}) - Cs + C(\dot{q}_d + \beta e) + G + F + \tau_d - \tau \\ &= -Cs - \tau + g + \tau_d \end{aligned} \quad (4)$$

với  $g = D(\ddot{q}_d + \beta\dot{e}) + C(\dot{q}_d + \beta e) + G + F$

Trong kỹ thuật thực tế, thông tin mô hình trong phương trình (4) thường không được biết, trong phân này, nghiên cứu sử dụng mạng nơ-ron RBF với MPL để xấp xỉ hàm  $g$ , sau đó nghiên cứu có thể thiết kế bộ điều khiển mà không cần lập mô hình.

Đối với khớp thứ  $i$ , thuật toán của mạng RBF là:

$$h_{ij} = \exp\left(\frac{\|x_i - c_{ij}\|^2}{\sigma_{ij}^2}\right), j = 1, \dots, 7 \quad (5)$$

$$g_i = w_i^T h_i + \varepsilon_i, \quad (6)$$

trong đó,  $x_i = [e_i \quad \dot{e}_i \quad q_{di} \quad \dot{q}_{di} \quad \ddot{q}_{di}]$  là đầu vào của mạng nơ-ron RBF,  $h_i = [h_{i1} \quad h_{i2} \quad \dots \quad h_{i7}]^T$ ,  $\varepsilon_i$  là sai số xấp xỉ và  $w_i$  là giá trị trọng số mong muốn.

Theo biểu thức  $g_i$ , các đầu vào của mạng nơ-ron RBF được chọn như (7):

$$X = [e \quad \dot{e} \quad q_d \quad \dot{q}_d \quad \ddot{q}_d] \quad (7)$$

thì

$$g = [g_1 \quad \dots \quad g_i \quad \dots \quad g_n]^T = \begin{bmatrix} w_1^T h_1 + \varepsilon_1 \\ \vdots \\ w_i^T h_i + \varepsilon_i \\ \vdots \\ w_n^T h_n + \varepsilon_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1^T h_1 \\ \vdots \\ w_i^T h_i \\ \vdots \\ w_n^T h_n \end{bmatrix} + \varepsilon \quad (8)$$

trong đó,  $\varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \dots \quad \varepsilon_i \quad \dots \quad \varepsilon_n]$ ,  $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_N$ .

### 2.3. Thiết kế và phân tích bộ điều khiển dựa trên MPL

Định nghĩa  $\hat{w}_i$  là ước lượng của  $w_i$ , sau đó xác định:

$$\tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i, \quad \|\tilde{w}_i\|_F \leq w_{i\max} \quad (9)$$

Định nghĩa tham số cực tiểu là  $\chi = \max_{1 \leq i \leq n} \{\|\tilde{w}_i\|^2\}$ , trong đó  $\chi$  là hằng số dương và  $\hat{\chi}$  là ước lượng của  $\chi$ ,  $\tilde{\chi} = \hat{\chi} - \chi$ .

Định nghĩa  $W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$ ,  $H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{W} = W - \hat{W}$ , ta có [21]:

$$W \circ H = \begin{bmatrix} w_1^T h_1 \\ \vdots \\ w_n^T h_n \end{bmatrix}, \quad s \circ s = \begin{bmatrix} s_1^T s_1 \\ \vdots \\ s_n^T s_n \end{bmatrix} \quad \text{và} \quad H \circ H = \begin{bmatrix} h_1^T h_1 \\ \vdots \\ h_n^T h_n \end{bmatrix}, \quad \text{sau đó } g \text{ có thể được biểu diễn}$$

dưới dạng:

$$g = W \circ H + \varepsilon \quad (10)$$

Thiết kế luật điều khiển như (11):  $\tau = \frac{1}{2} \hat{\chi} s \circ (H \circ H) + K_v s - \mathcal{G}$  (11)

Trong đó  $\mathcal{G}$  là thành phần bền vững để khắc phục sai số xấp xỉ  $\varepsilon$ .

Thành phần bền vững  $\mathcal{G}$  được thiết kế như (12):  $\mathcal{G} = -(\varepsilon_N + z_d) \text{sign}(s)$  (12)

trong đó  $\|\tau_d\| \leq z_d$ .

Thế phương trình (11) vào phương trình (4), ta có:

$$\mathbf{D}\dot{\mathbf{s}} = -(\mathbf{K}_V + \mathbf{C})\mathbf{s} - \frac{1}{2}\hat{\chi}\mathbf{s} \circ (\mathbf{H} \circ \mathbf{H}) + (\mathbf{g} + \boldsymbol{\tau}_d) + \boldsymbol{\vartheta} \quad (13)$$

Định nghĩa hàm Lyapunov như (14): 
$$V = \frac{1}{2}\mathbf{s}^T \mathbf{D}\mathbf{s} + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\chi}^2, \gamma > 0 \quad (14)$$

Lấy đạo hàm của (14), ta được (15):

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \mathbf{D}\dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2}\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{D}}\mathbf{s} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}} = \mathbf{s}^T \left[ -\frac{1}{2}\hat{\chi}\mathbf{s} \circ (\mathbf{H} \circ \mathbf{H}) + \mathbf{W} \circ \mathbf{H} \right] - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} + \mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\vartheta}) + \frac{1}{\gamma}\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}} \quad (15)$$

vì

$$\mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{D}} - 2\mathbf{C})\mathbf{s} = 0$$

$$\mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\vartheta}) = \mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d - (\boldsymbol{\varepsilon}_N + \mathbf{z}_d) \text{sign}(\mathbf{s})) \leq 0$$

$$\mathbf{s}^T [\mathbf{W} \circ \mathbf{H}] = [s_1 \quad \dots \quad s_n] \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_n^T \mathbf{h}_n \end{bmatrix} = s_1 \mathbf{w}_1^T \mathbf{h}_1 + \dots + s_n \mathbf{w}_n^T \mathbf{h}_n = \sum_{i=1}^n s_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_i$$

$$s_i^2 \chi \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i + 1 \geq s_i^2 \|\mathbf{w}_i\|^2 \|\mathbf{h}_i\|^2 + 1 \geq 2s_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_i$$

nên

$$s_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_i \leq \frac{1}{2} s_i^2 \chi \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} s_i^2 \chi \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i + \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$\mathbf{s}^T [\mathbf{W} \circ \mathbf{H}] \leq \frac{1}{2} \chi \sum_{i=1}^n s_i^2 \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i + \frac{n}{2} \quad (17)$$

$$\mathbf{s}^T \left[ -\frac{1}{2}\hat{\chi}\mathbf{s} \circ (\mathbf{H} \circ \mathbf{H}) \right] = -\frac{1}{2}\hat{\chi} [s_1 \quad \dots \quad s_n] \left( \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_n^T \mathbf{h}_n \end{bmatrix} \right) \quad (18)$$

$$= -\frac{1}{2}\hat{\chi} [s_1 \quad \dots \quad s_n] \begin{bmatrix} s_1 \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ s_n \mathbf{h}_n^T \mathbf{h}_n \end{bmatrix} = -\frac{1}{2}\hat{\chi} (s_1^2 \|\mathbf{h}_1\|^2 + \dots + s_n^2 \|\mathbf{h}_n\|^2) = -\frac{1}{2}\hat{\chi} \sum_{i=1}^n s_i^2 \|\mathbf{h}_i\|^2$$

trong đó,  $n$  biểu thị số lượng khớp, với tay máy hai thanh,  $n = 2$ .

Sau đó, ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\frac{1}{2}\hat{\chi} \sum_{i=1}^n s_i^2 \|\mathbf{h}_i\|^2 + \frac{1}{2}\hat{\chi} \sum_{i=1}^n s_i^2 \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i + \frac{n}{2} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} \\ &= -\frac{1}{2}\tilde{\chi} \sum_{i=1}^n s_i^2 \|\mathbf{h}_i\|^2 + \frac{n}{2} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\chi}\dot{\tilde{\chi}} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} = \tilde{\chi} \left( -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n s_i^2 \|\mathbf{h}_i\|^2 + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\chi}} \right) + \frac{n}{2} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} \end{aligned} \quad (19)$$

Thiết kế luật thích nghi như (20):

$$\dot{\tilde{\chi}} = \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^n s_i^2 \|\mathbf{h}_i\|^2 \quad (20)$$

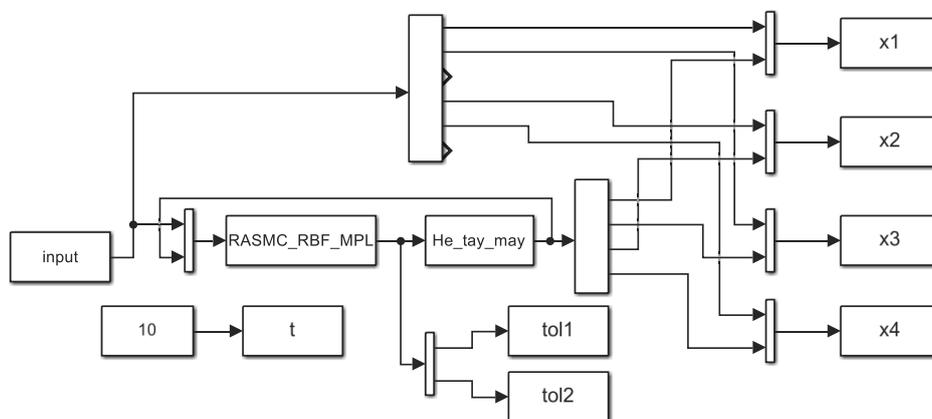
Sau đó:

$$\dot{V} \leq \frac{n}{2} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s} \quad (21)$$

Để đảm bảo  $\dot{V} \leq 0$ , ta phải đảm bảo  $\frac{n}{2} \leq \mathbf{s}^T \mathbf{K}_V \mathbf{s}$  thì ta có (22): 
$$\|\mathbf{s}\| \leq \sqrt{\frac{n}{2\mathbf{K}_V}} \quad (22)$$

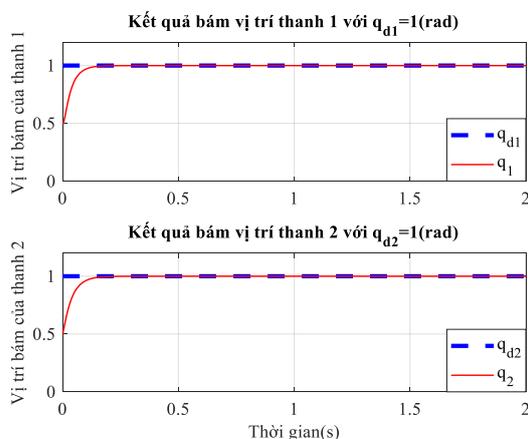
### 3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu (RASMC-RBF-MPL) trong MATLAB/Simulink được trình bày như Hình 2.

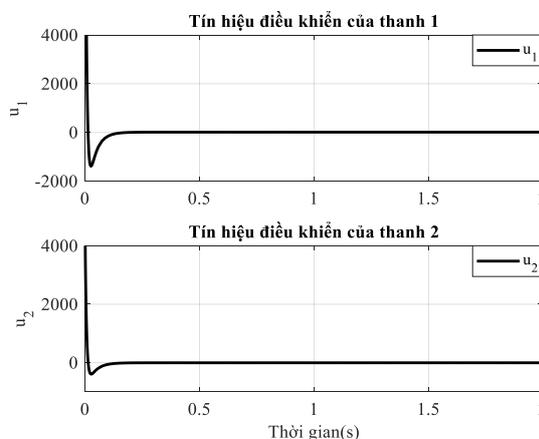


Hình 2. Sơ đồ mô phỏng RASMC-RBF-MPL trong MATLAB/Simulink

Các thông số được sử dụng trong mô phỏng như sau [14]:  $K_V = \text{diag}\{200, 200\}$ ,  $\beta = \text{diag}\{60, 60\}$ ,  $b = 0,25$ ,  $\varepsilon_N = 0,5$ ,  $z_d = 0,2$ ,  $\gamma = 600$ , số nơ-ron ở lớp ẩn của mạng RBF là 7 nơ-ron, các trạng thái ban đầu của tay máy là  $[0,5 \ 0 \ 0,5 \ 0]$ , hàm  $\tanh$  (tangent hyperbolic) được sử dụng thay thế cho hàm signum ( $\text{sign}$ ).



Hình 3. Đáp ứng vị trí của thanh 1 và 2 với đầu vào Step

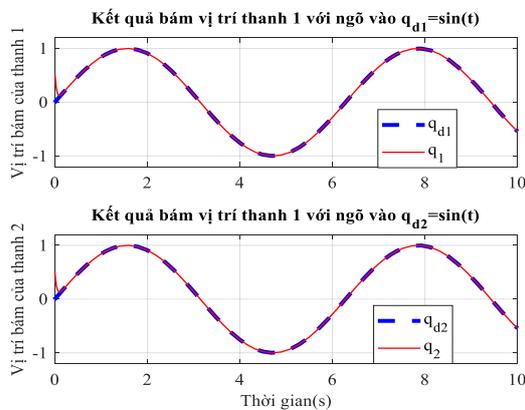


Hình 4. Tín hiệu điều khiển của thanh 1 và 2 với đầu vào Step

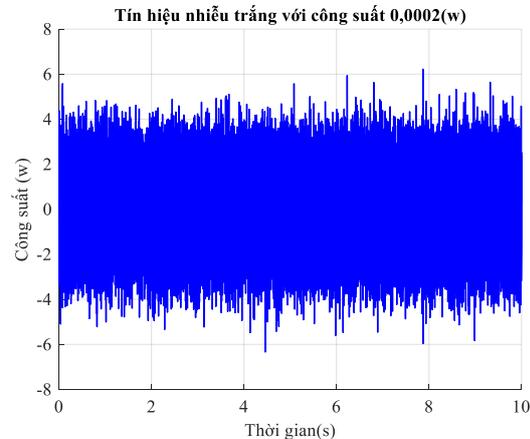
Đáp ứng vị trí của thanh 1 và 2 bộ điều khiển RASMC-RBF-MPL với đầu vào  $q_{d1} = q_{d2} = 1(\text{rad})$  được trình bày như Hình 3. Kết quả Hình 3 cho thấy rằng vị trí thực tế của thanh 1 ( $q_1$ ) và 2 ( $q_2$ ) tiến về vị trí mong muốn  $q_{d1}$  và  $q_{d2}$  trong thời gian hữu hạn với thời gian tăng, thời gian xác lập, độ quá điều chỉnh, sai số xác lập của thanh 1 lần lượt là 0,0747(s), 0,1376(s), 0,002 (%), 0(rad) và của thanh 2 là 0,0844(s), 0,152(s), 0(%), 0(rad). Nhược điểm của bộ điều khiển trượt đã được khắc phục với bộ điều khiển đề xuất trong nghiên cứu này (Hình 4).

Hình 5 trình bày tín hiệu bám vị trí của thanh 1 và 2 với đầu vào  $[\sin t \ \sin t]^T$ . Vị trí thực tế của thanh 1 và 2 vẫn hội tụ về vị trí đặt trước trong thời gian hữu hạn với sai số hội tụ về 0. Hình 7 và Hình 8 trình bày tín hiệu bám vị trí thanh 1 và 2 với đầu vào Step và Since khi có nhiễu

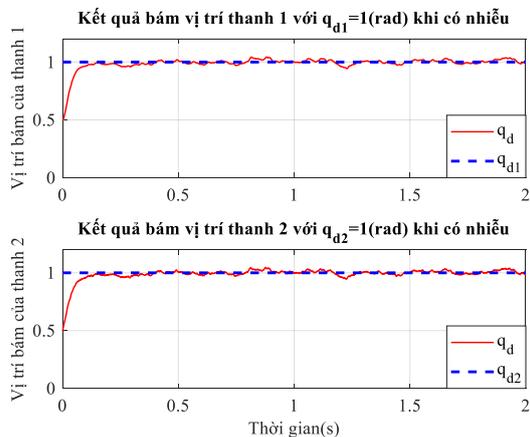
(Hình 6) tác động ở đầu ra của hệ tay máy (giả sử nhiễu trắng có công suất 0,0002(w), thời gian lấy mẫu 0,0001(s)). Vị trí thực tế của thanh 1 và 2 vẫn hội tụ về vị trí cho trước.



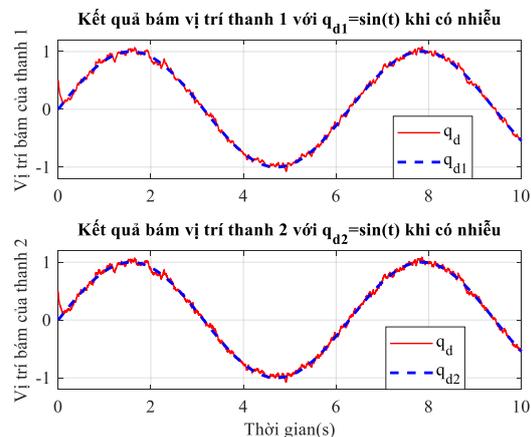
**Hình 5.** Đáp ứng vị trí thanh 1 và 2 với đầu vào *Sin*



**Hình 6.** Tín hiệu nhiễu trắng



**Hình 7.** Tín hiệu bám vị trí thanh 1 và 2 với đầu vào *Step* khi có nhiễu



**Hình 8.** Tín hiệu bám vị trí thanh 1 và 2 với đầu vào *Sin* khi có nhiễu

Các kết quả đạt được chứng tỏ bộ điều khiển đề xuất phù hợp với ứng dụng điều khiển bám vị trí hệ tay máy.

#### 4. Kết luận

Bộ điều khiển trượt thích nghi bền vững dựa vào mạng nơ-ron RBF với phương pháp học thông số cực tiểu cho hệ tay máy được thiết kế và thực hiện trong nghiên cứu này. Mạng nơ-ron RBF với MPL đã được sử dụng để xấp xỉ hàm  $g$  và sau đó nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển mà không cần lập mô hình. Các trọng số của mạng nơ-ron RBF được cập nhật trực tuyến bằng giải thuật Quasi Newton căn cứ theo các luật thích nghi bền vững. Phương pháp học thông số cực tiểu được sử dụng trong nghiên cứu này để hệ thống chỉ còn một thông số thích nghi trực tuyến, giảm gánh nặng tính toán và tăng hiệu quả thời gian thực. Các kết quả mô phỏng và khảo sát cho thấy rằng vị trí thực tế của thanh 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 quá điều chỉnh, sai số xác lập của thanh 1 lần lượt là 0,0747(s), 0,1376(s), 0,002 (%), 0(rad) và của thanh 2 là 0,0844(s), 0,152(s), 0(%), 0(rad). Các kết quả này đã chứng minh sự phù hợp và bền vững của bộ điều khiển đề xuất với ứng dụng điều khiển bám vị trí hệ tay máy. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ ứng dụng giải thuật tối ưu để xác định số nơ-ron ở lớp ẩn trong mạng nơ-ron RBF.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] B. Mahboub and D. Stephen, "A Two-Link Robot Manipulator: Simulation and Control Design," *Int. J. Robot Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 1-17, 2020.
- [2] Z. Dachang, D. Baolin, Z. Puchen, and W. Wu, "Adaptive Backstepping Sliding Mode Control of Trajectory Tracking for Robotic Manipulators," *Complexity*, vol. 2020, pp. 1-11, 2020.
- [3] H. Wang, L. Fang, T. Song, J. Xu, and H. Shen, "Model-free adaptive sliding mode control with adjustable funnel boundary for robot manipulators with uncertainties," *Review of Scientific Instruments*, vol. 92, no. 6, pp. 1-10, 2021.
- [4] Z. Wang, "Adaptive Fuzzy System Compensation Based Model-Free Control for Steer-by-Wire Systems with Uncertainty," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 17, no. 1, pp. 141-152, 2021.
- [5] T. Yang, N. Sun, and Y. Fang, "Adaptive Fuzzy Control for a Class of MIMO Underactuated Systems with Plant Uncertainties and Actuator Dead zones: Design and Experiments," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 52, no. 8, pp. 8213-8226, Aug. 2022.
- [6] G. Lin, J. Yu, and J. Liu, "Adaptive Fuzzy Finite-Time Command Filtered Impedance Control for Robotic Manipulators," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50917-50925, 2021.
- [7] S. Diao, W. Sun, L. Wang, and J. Wu, "Finite-Time Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Systems with Unknown Backlash-Like Hysteresis," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 23, no. 7, pp. 2037-2047, 2021.
- [8] H. Lee, D. Nam, and C. H. Park, "A Sliding Mode Controller Using Neural Networks for Robot Manipulator," *Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks Bruges (Belgium)*, vol. 23, no. 9, pp. 193-198, 2004.
- [9] W. K. Alqaisi, B. Brahmi, J. Ghommam, M. Saad, and V. Nerguizian, "Adaptive Sliding mode Control Based on RBF Neural Network Approximation for Quadrotor," in *2019 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2019, pp. 1-7.
- [10] H. Feng *et al.*, "A new adaptive sliding mode controller based on the RBF neural network for an electro-hydraulic servo system," *ISA Transactions*, vol. 129, pp. 472-484, 2022.
- [11] T. T. Pham, C.-N. Nguyen, T. K. M. Le, H. T. Vo, V. H. Dong, and N. P. Nguyen, "Adaptive Sliding Mode Control with RBF Neural Networks for Omni-Directional Mobile Robot," *Journal of Technical Education Science*, vol. 49, pp. 80-87, 2018.
- [12] T. T. Pham and C.-N. Nguyen, "Adaptive Sliding Mode Control Based on Rbf Neural Network for Two Tanks Interacting System," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 226, no. 11, pp. 323-331, 2021.
- [13] H. X. Le, T. V. Nguyen, A. V. Le, T. A. Phan, N. H. Nguyen, and M. X. Phan, "Adaptive hierarchical sliding mode control using neural network for uncertain 2D overhead crane," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 7, no. 3, pp. 996-1004, 2019.
- [14] J. F. Li and F. H. Xiang, "RBF Network Adaptive Sliding Mode Control of Ball and Plate System Based on Reaching Law," *Arabian Journal for Science and Engineering*, no. 8, pp. 9393-9404, 2021.
- [15] H. Zhang and Y. Liu, "Adaptive RBF neural network based on sliding mode controller for active power filter," *International Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 4, pp. 460-481, 2020.
- [16] M. N. T. Shnata and N. Z. Azlan, "Adaptive sliding mode control with radial basis function neural network for time dependent disturbances and uncertainties," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 4123-4129, 2016.
- [17] J. Wang, J. Wang, and T. Zhang, "RBF Neural Network based Adaptive Sliding Mode Control for Hypersonic Flight Vehicles," *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, 2016, pp. 58-63.
- [18] J. Qin and J. Du, "Minimum-learning-parameter-based adaptive finite-time trajectory tracking event-triggered control for underactuated surface vessels with parametric uncertainties," *Ocean Engineering*, vol. 271, no. 11, pp. 1-12, 2023.
- [19] K. Krishan, D. Ghosh, A. Upadhyay, J. Yao, X. Zhao, and A. Upadhyay, "Quasi-Newton methods for multiobjective optimization problems: A systematic review," *Applied Set-Valued Analysis and Optimization*, vol. 5, no. 2, pp. 291-321, 2023.
- [20] N. M. Ghaleb and A. A. Aly, "Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm," *Inter. J. of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 8-23, 2018.
- [21] J. Liu, *Sliding Mode Control Using MATLAB*, Elsevier Science, 2017.