

BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI ĐIỀU KHIỂN CÁNH TAY ROBOT TRÊN CƠ SỞ CỦA MẠNG NƠ RON

ADAPTIVE ROBUST CONTROLLER BASED ON NEURAL NETWORKS FOR INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATOR

Vũ Thị Yến¹, Phạm Văn Cường^{1,*}

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất một bộ điều khiển bền vững thích nghi trên cơ sở mạng nơ ron cho robot công nghiệp. Trong thực tế robot là một hệ phi tuyến và trong quá trình làm việc, chúng thường phải chịu đựng ma sát phi tuyến, sự thay đổi của tải và nhiễu bên ngoài tác động... Để giải quyết vấn đề này, một bộ điều khiển thông minh đã được thiết kế trên cơ sở kế thừa ưu điểm của bộ điều khiển thích nghi nơ ron và SMC để điều khiển vị trí của một robot công nghiệp. Ở đây, bộ điều khiển ARNNs được sử dụng để xấp xỉ động lực học chưa biết mà không yêu cầu kiến thức trước đó. Ngoài ra, SMC là một hướng điều khiển phi tuyến được biết đến vì khả năng bền vững của nó. Hàm bền vững đã được chọn như là một bộ điều khiển phụ để đạt được sự ổn định và bền vững dưới các môi trường khác nhau. Luật thích nghi cho các trọng số của ARNNs đã được thiết lập bằng thuyết ổn định Lyapunov sao cho tính ổn định của bộ điều khiển đưa ra được đảm bảo. Hiệu quả và tính bền vững của phương pháp điều khiển đưa ra được chứng minh bằng việc so sánh các kết quả mô phỏng.

Từ khóa: Điều khiển thích nghi, điều khiển trượt, mạng nơ ron, hệ thống phi tuyến, tay máy robot.

ABSTRACT

This paper proposed an adaptive robust controller based on neural networks for industrial robot manipulator (IRM). In fact, robot manipulators are a nonlinear system and in the working process, they usually bear the nonlinear friction, payload variation external disturbance, etc. To deal with these problems, an intelligent controller which is designed based on inheriting the advantages of the robust adaptive NNs and SMC scheme to investigate to the joint position control of industrial robot manipulator. Here, the ARNNs are used to approximate the unknown dynamics without the requirement of prior knowledge. In addition, sliding mode control (SMC) is a well-known nonlinear control strategy because of its robustness. A robust term function is selected as an auxiliary controller to guarantee the stability and robustness under various environments. The adaptation laws for the weights of the ARNNs are adjusted using the Lyapunov stability theorem such that the stability of the proposed control systems is guaranteed. The effectiveness and robustness of the proposed methods are demonstrated by comparative simulation results.

Keywords: Adaptive control, sliding mode control, neural networks, nonlinear system, Robot manipulator.

¹Khoa Điện, trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: cuongpv0610@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/10/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/01/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2022

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Điều khiển robot công nghiệp luôn luôn là một mảng nghiên cứu thú vị và thu hút được sự chú ý của nhiều nhà nghiên cứu. Trong thực tế, Robot công nghiệp là một hệ thống phi tuyến nhiều biến và rất phức tạp. Chúng luôn luôn chịu tác động của các tín hiệu không rõ trong động lực học, như sự tác động của nhiễu, trọng lượng tải thay đổi, ma sát phi tuyến... Để giải quyết vấn đề này, có rất nhiều phương pháp điều khiển được đưa ra, bao gồm bộ điều khiển PID, thích nghi, điều khiển trượt... đã được đề cập trong các tài liệu [1-6]. Như chúng ta đã biết, điều khiển trượt và điều khiển thích nghi là những phương pháp điều khiển phi tuyến đơn giản hiệu quả. Các bộ điều khiển kiểu này cần phải biết rõ các thống số của mô hình đối tượng cũng như các chặn trên của các thành phần bất định của mô hình. Tuy nhiên với các hệ thống phi tuyến lớn và nhiễu tác động thì việc thiết kế hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển trượt và điều khiển thích nghi là rất phức tạp. Do đó để giải quyết vấn đề này, các ứng dụng của bộ điều khiển thông minh trên cơ sở logic mờ và mạng nơ ron để điều khiển vị trí của cánh tay robot được đưa ra. Bộ điều khiển mờ là một công cụ hiệu quả trong việc xấp xỉ hệ thống phi tuyến [7-10]. Trong [8] một bộ điều khiển mờ lai kết hợp giữa công nghệ Backstepping và phương pháp xấp xỉ mờ đã được đưa ra để điều khiển hệ thống phi tuyến với cấu trúc không xác định và có sự tác động của nhiễu bên ngoài. Bộ điều khiển đó đã đảm bảo được hiệu quả bám và sai lệch bán theo yêu cầu. Trong [10] một nghiên cứu mới đã được đưa ra bằng việc kết hợp giữa hệ thống logic mờ Takagi-Sugeno với công nghệ backstepping. Thuật toán điều khiển bền vững thích nghi mờ cho hệ thống ngoài khuếch đại đầu vào không biết rõ và thuật toán điều khiển bền vững thích nghi mờ trượt với khuếch đại đầu vào không biết rõ cũng đã được đưa ra. Cả hai phương pháp này có thể đảm bảo rằng vòng lặp kín của hệ thống làm cho hệ thống ổn định trong giới hạn đưa ra. Tuy nhiên trong tất cả các tài liệu trên luật của bộ điều khiển mờ được xây dựng dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế. Vì thế, bằng những kiến thức kinh nghiệm đó nhiều khi không đủ và rất khó để xây dựng được bộ điều khiển tối ưu. Để giải quyết vấn đề này, trong bài báo này đã đưa ra bộ điều khiển bền vững thích nghi dựa trên cơ sở của bộ điều khiển nơ ron (ARNNs). Bằng việc kế thừa các thuận lợi của bộ điều khiển nơ ron đó là khả năng học online các luật trong

quá trình bộ điều khiển làm việc, do đó khi áp dụng bộ điều khiển này vào điều khiển robot công nghiệp thì hiệu quả bán, tốc độ hội tụ đã được cải thiện đáng kể.

2. ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT

Xét phương trình động lực học của robot:

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

ở đây, $(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{n \times 1}$ là vị trí, vận tốc và gia tốc của robot. $M(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận khối lượng suy rộng. $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ là ma trận ly tâm và Coriolis. $G(q) \in R^{n \times 1}$ là một véc tơ mô tả thành phần trọng lượng, $\tau \in R^{n \times 1}$ là mô men điều khiển.

Để thiết kế bộ điều khiển chúng ta đưa ra một số tính chất cho (1) như sau:

Tính chất 1: Ma trận khối lượng suy rộng $M(q)$ là một ma trận đối xứng và xác định dương

$$M(q) \leq m_0 I \tag{2}$$

Trong đó $m_0 > 0$ và $m_0 \in R$

Tính chất 2: $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ là ma trận đối xứng lệch cho véc tơ x bất kỳ:

$$x^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] x = 0 \tag{3}$$

Tính chất 3: $C(q, \dot{q})\dot{q}$, $F(\dot{q})$ được giới hạn theo:

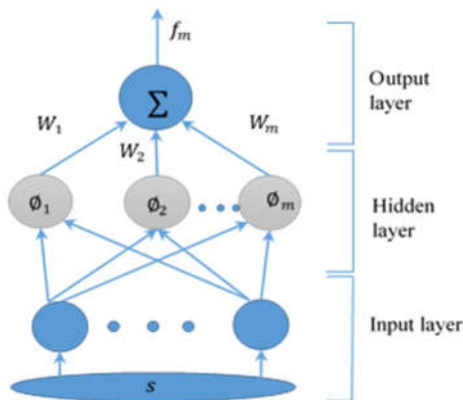
$$\|C(q, \dot{q})\dot{q}\| \leq C_k \|\dot{q}\|^2 \tag{4}$$

ở đây C_k là hằng số dương.

3. CẤU TRÚC BỘ ĐIỀU KHIỂN NNs

Cấu trúc bộ điều khiển NNs gồm có 3 lớp gồm:

- Lớp 1 là lớp đầu vào (Input layer): gồm các biến đầu vào $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$,



Hình 1. Cấu trúc của NNs

- Lớp thứ 2 là lớp ẩn (The hidden layer): đầu ra của lớp ẩn được tính toán theo công thức sau:

$$\phi_j(s) = \exp \left[-\frac{(s - c_j)^2}{2d_j^2} \right] \tag{5}$$

Trong đó: m là số nơ ron lớp ẩn và $c_j = c_{j1}, \dots, c_{jn}$ là vector trung tâm của mạng. d_j là độ lệch chuẩn của hàm xuyên tâm thứ j , $d = [d_1, \dots, d_m]^T$. ϕ_j là hàm Gaussian của mạng nơ ron j .

- Lớp 3 là lớp đầu ra (output layer), đầu ra của mạng nơ ron được tính toán như sau:

$$f_j(s) = \sum_{j=1}^m W_{ji} \phi_j(s), j = 1, \dots, m \tag{6}$$

Ở đây: W_{ji} là trọng số kết nối giữa nơ ron lớp ẩn thứ j và nơ ron đầu ra thứ i , n là số đầu vào.

Công thức (6) có thể viết lại như sau:

$$f(s) = W\phi(s) \tag{7}$$

Trong đó: W là trọng số của mạng nơ ron,

$$\phi(s) = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$$

Sau đây, chúng ta sử dụng bộ điều khiển NNs này giống như một xấp xỉ trong bộ điều khiển đã được thiết kế. Khi đó sẽ tồn tại một hàm NNs tối ưu với các tham số tối ưu như sau:

$$f(s) = W^* \phi(s) + \varepsilon \tag{8}$$

Trong đó: W^* là giá trị trọng số tối ưu, và ε là vector sai lệch xấp xỉ.

Giả thiết: Sai lệch xấp xỉ được giới hạn:

$$\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_0 \tag{9}$$

ở đây ε_0 là giá trị thực dương.

Đầu ra của bộ điều khiển NNs là giá trị xấp xỉ và được tính theo công thức sau:

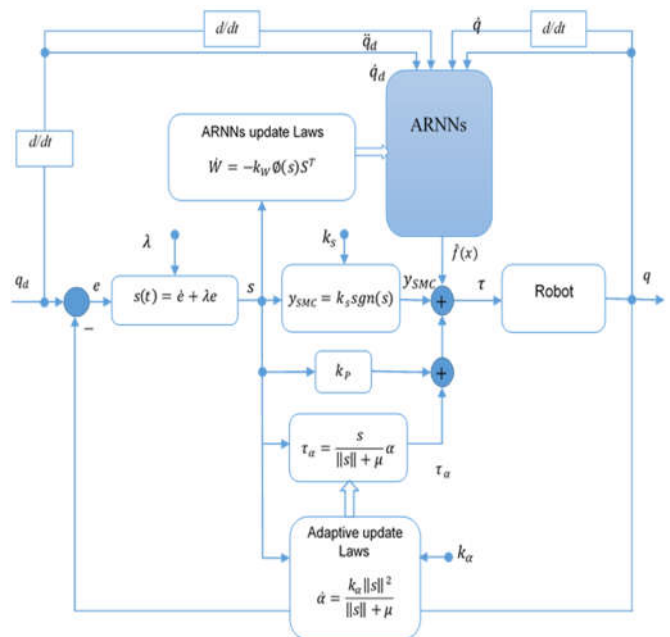
$$\hat{f}(s) = \hat{W}^T \phi(s) \tag{10}$$

Trong đó: \hat{f}, \hat{W} là giá trị xấp xỉ của f^*, W^* ,

$$W^T = [W_1^T, W_2^T, \dots, W_m^T]$$

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN ARNNs

Mục đích thiết kế bộ điều khiển ARNNs để khi Robot dưới sự tác động của lực τ thì sai lệch bám giữa vị trí mong muốn của các khớp q_d với véc tơ vị trí thực tế của robot q có thể được hội tụ về 0 khi $t \rightarrow \infty$. Cấu trúc của bộ điều khiển robot được thiết kế như hình 2.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển robot công nghiệp

$e(t)$, $\dot{e}(t)$ tương ứng là sai lệch vị trí và sai lệch vận tốc. Luật thích nghi sẽ được xác định như sau:

$$e(t) = q_d - q \tag{11}$$

$$s(t) = \dot{e} + \lambda e \tag{12}$$

Ở đây $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ là ma trận khuếch đại hằng số dương.

Từ công thức (1) có thể viết lại như sau:

$$\begin{aligned} M(q) * (\ddot{q}_d - \ddot{e}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d - \dot{e}) + G(q) &= \tau \\ M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e} - \ddot{s}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d + \lambda \dot{e} - \dot{s}) + G(q) &= \tau \\ M\dot{s} + Cs = M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q}) & \tag{13} \\ & * (\dot{q}_d + \lambda \dot{e}) + G(q) - \tau \end{aligned}$$

$$M\dot{s} + Cs = y - \tau \tag{14}$$

Ở đây $f = M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d + \lambda \dot{e}) + G(q)$

Từ sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển robot hình 2 ta có:

$$\tau = \hat{f} + y_{SMC} + k_p s + \tau_\alpha \tag{15}$$

Trong đó \hat{f} tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển NNs, \hat{y} , y_s là bộ điều khiển trượt (SMC) và τ_α là tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển thích nghi.

Ở đây bộ điều khiển trượt được chọn như sau:

$$y_{SMC} = k_s \text{sgn}(s) \tag{16}$$

Bộ điều khiển thích nghi được tính toán như sau:

$$\tau_\alpha = \frac{s}{\|s\| + \mu} \alpha \tag{17}$$

Thay (15) vào (14) ta thu được:

$$M\dot{s} = \tilde{f} - Cs - k_p s - y_{SMC} - \tau_\alpha + \varepsilon \tag{18}$$

Trong đó: $\tilde{f} = f - \hat{f}$

Để hệ thống làm việc ổn định việc chọn luật học thích nghi của bộ điều khiển sẽ được chọn như sau:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{W}} = k_w \vartheta(s) s^T \\ \dot{\alpha} = \frac{k_\alpha \|s\|^2}{\|s\| + \mu} \end{cases} \tag{19}$$

CHỨNG MINH TÍNH ỔN ĐỊNH CỦA HỆ THỐNG

Xét robot có phương trình động học như phương trình (1) và bộ điều khiển NNs có luật thích nghi như công thức (19). Phân tích tính ổn định của hệ thống theo thuyết Lyapunov.

Xét hàm Lyapunov có phương trình như sau:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^T Ms + \frac{1}{2} (\tilde{W}^T k_w^{-1} \tilde{W}) + \frac{1}{2k_\alpha} \alpha^2 \tag{20}$$

Đạo hàm bậc nhất $V(t)$ theo thời gian ta thu được phương trình như sau:

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + s^T Ms + \frac{1}{k_w} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{k_\alpha} \dot{\alpha} \tag{21}$$

Thay (18) vào (21) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + s^T (\tilde{f} - Cs - k_p s - y_{SMC} - \tau_\alpha + \varepsilon) \\ &+ \frac{1}{k_w} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{k_\alpha} \dot{\alpha} \end{aligned} \tag{22}$$

Áp dụng tính chất 2 và thay thế $\dot{\tilde{W}} = -\dot{\tilde{W}}$, vào (22):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -s^T k_p s + s^T \left(\tilde{f} - y_{SMC} - \frac{s}{\|s\| + \mu} + \varepsilon \right) \\ &- \frac{1}{k_w} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{k_\alpha} \dot{\alpha} \end{aligned} \tag{23}$$

Thay (16), (17) và (19) vào (23) ta có:

$$\dot{V}(t) = -s^T k_p s - s^T k_s \text{sgn}(s) + s^T \varepsilon \tag{24}$$

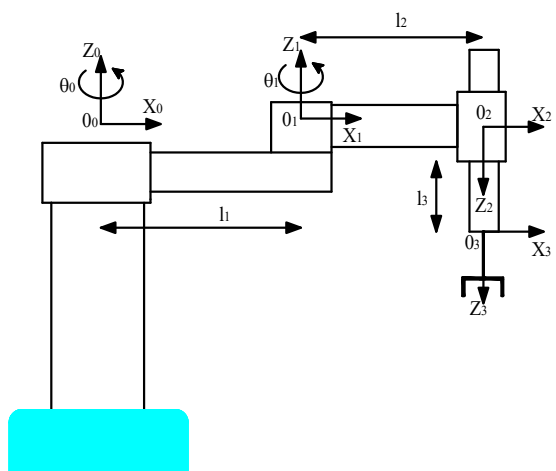
Sử dụng công thức (9) vào (24) ta:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -s^T k_p s - s^T k_s \text{sgn}(s) + \varepsilon_0 \\ \dot{V}(t) &\leq -s^T k_p s \end{aligned} \tag{25}$$

Do đó $\dot{V}(t) \leq 0$

Từ kết quả cho thấy hệ thống được ổn định không phụ thuộc vào s

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG



Hình 3. Robot 3 bậc tự do

Trong phần này chúng ta mô phỏng hệ thống điều khiển cho robot công nghiệp 3 bậc tự do (hình 3).

Phương trình động học của robot như sau:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = l_1^2 \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) + l_1 l_2 (m_2 + 2m_3) \cos(q_2) + l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right)$$

$$M_{12} = -l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) \cos(q_2) - l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right)$$

$$M_{13} = M_{23} = M_{31} = M_{32} = 0; M_{21} = M_{12};$$

$$M_{22} = l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right); M_{33} = m_3$$

$$C_{11} = -\dot{q}_2 (m_2 + 2m_3); C_{12} = C_{21};$$

$$C_{13} = C_{22} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = 0$$

$$g_1 = g_2 = g_3 = -m_3 g;$$

Trong đó m_1, m_2, m_3 là khối lượng của khớp 1, khớp 2 và khớp 3 tương ứng. l_1, l_2, l_3 , là chiều dài của khớp 1, khớp

2 và khớp 3 tương ứng. $g = 9,8(m/s)$ giá trị của gia tốc trọng trường. $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ vị trí của khớp 1, khớp 2 và khớp 3. Chọn giá trị của vị trí mẫu cho khớp 1, khớp 2 và khớp 3

$$q_d = [q_{1d} \ q_{2d} \ q_{3d}]^T = [0,5\sin(1,5t) \ 0,5 \sin(2t) \ 0,5 \sin(1,5t)]^T$$

Sai lệch bình phương trung bình (MSE) theo vị trí được xác định như sau [11]:

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [q(t) - q_d(t)]^2 \tag{26}$$

Ở đây T là chu kỳ. Giá trị của MSE để đánh giá hiệu suất điều khiển của bộ điều khiển.

NMSE là giá trị sai lệch bình phương trung bình tiêu chuẩn của phản hồi vị trí tính trên 1 rad để đánh giá hiệu suất điều khiển.

Thông số của robot: $m_1 = 4$ (kg), $m_2 = 3$ (kg), $m_3 = 1,5$ (kg); $l_1 = 0,4$ (m), $l_2 = 0,3$ (m), $l_3 = 0,2$ (m);

Các bước thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab

Bước 1: cài đặt các thông số của mạng nơ ron, các hệ số khuếch đại trong luật thích nghi: n, m, $k_w, \lambda, k_p, k_\alpha, K_s$

Bước 2: Khởi tạo các giá trị ban đầu của bộ điều khiển NNs với giá trị ngẫu nhiên.

Bước 3: Cập nhật tín hiệu vào của bộ điều khiển NNs, bộ điều khiển thích nghi, trọng số của bộ điều khiển NNs, tham số bộ điều khiển thích nghi, tính toán $s(t)$ theo công thức (12).

Bước 4: Tính toán đầu ra của bộ điều khiển NNs theo (10), đầu ra bộ điều khiển thích nghi theo công thức (17).

Bước 5: Điều chỉnh các giá trị trọng số của bộ điều khiển NNs, các tham số bộ điều khiển thích nghi theo công thức (19).

Bước 6: Đưa ra các trọng số của bộ điều khiển NNs, các tham số của bộ điều khiển thích nghi và quay lại bước 3.

Trường hợp 1: Nhiễu được chọn có dạng như sau:

$$\tau_0 = \begin{bmatrix} 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \end{bmatrix}$$

Hệ số khuếch đại trong luật thích nghi (19)

$$k_w = \lambda = \text{diag}[5, 5, 5];$$

$$k_p = \text{diag}[45, 45, 45];$$

$$k_\alpha = 0,1; k_s = \text{diag}[0,1; 0,1; 0,1]$$

Cấu trúc của bộ điều khiển NNs với $n = 6, m = 6$.

Trường hợp 2: Hệ thống đang làm việc sau thời gian 0,4s ta đưa thêm nhiễu có dạng như sau:

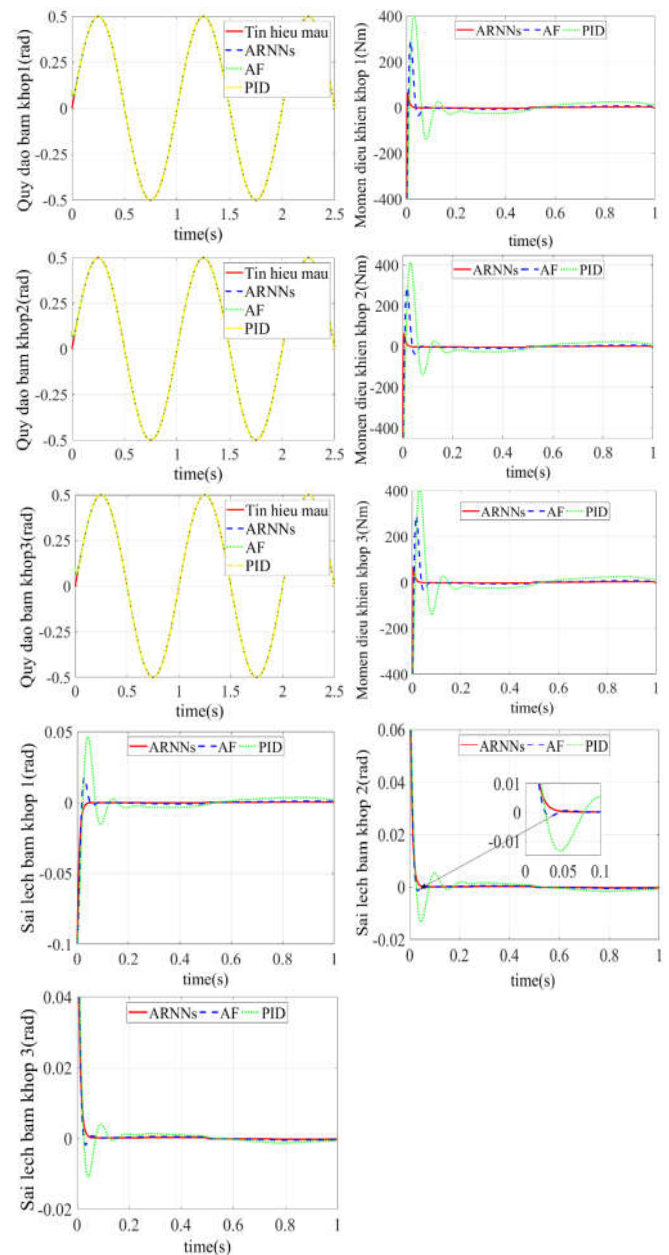
$$d_e(t) = [40 \sin(20t) \ 40 \sin(20t) \ 40 \sin(20t)]^T$$

Nhận xét: qua kết quả mô phỏng hình 4, 5, chúng ta thấy rằng cả ba bộ điều khiển ARNNs, AF [12] và PID đều đảm bảo tính ổn định và bền vững trong quá trình điều khiển robot. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng hình 4, 5 và kết quả so sánh giá trị sai lệch bình phương trung bình trong

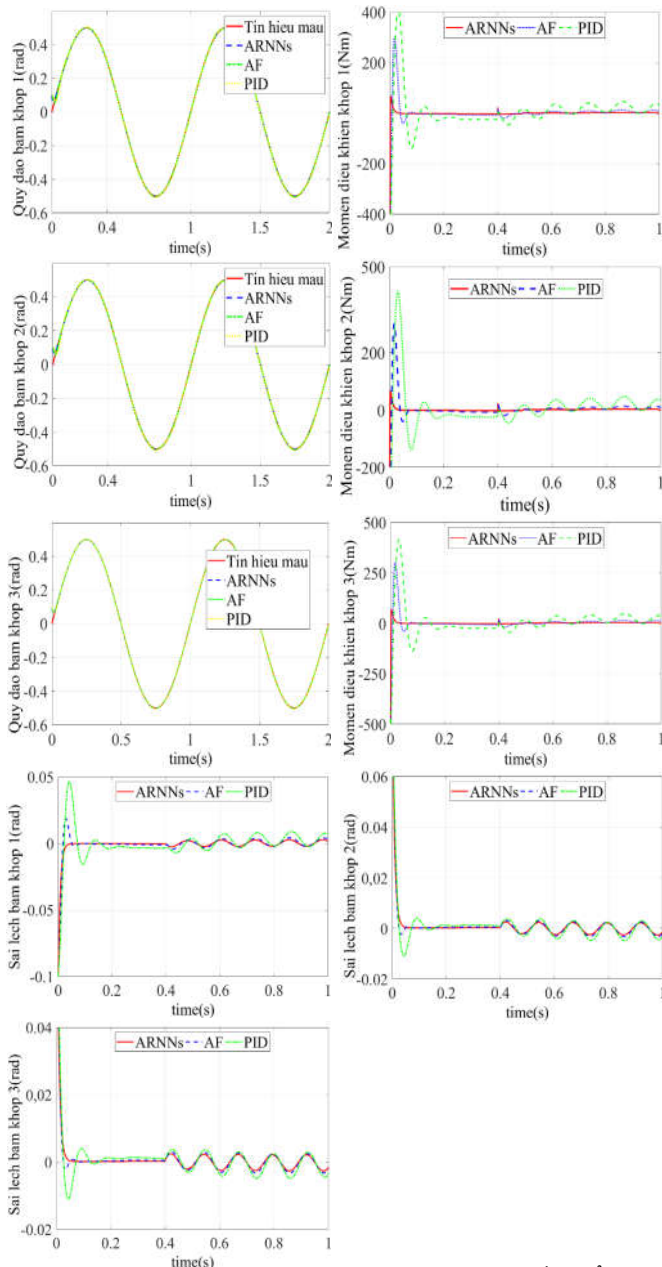
bảng 1 cho thấy, bộ điều khiển ARNNs sẽ hội tụ nhanh hơn và sai lệch bám cũng như mô men điều khiển nhỏ hơn bộ điều khiển AF [12] và PID. Điều đó chứng minh rằng chất lượng điều khiển robot bằng việc sử dụng bộ điều khiển ARNNs ổn định hơn, và khả năng bám được cải thiện.

Bảng 1. So sánh hiệu suất của bộ điều khiển ARNNs, AF và PID trong trường hợp 1

NMSE	Đơn vị: rad		
	Khớp 1	Khớp 2	Khớp 3
ARNNs	$5,156.10^{-4}$	$4,254.10^{-4}$	$3,972.10^{-4}$
AF [12]	$1,434.10^{-3}$	$1,045.10^{-3}$	$1,134.10^{-3}$
PID[14]	$3,475.10^{-3}$	$2,546.10^{-3}$	$2,765.10^{-3}$



Hình 4. Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Vị trí, Mô men điều khiển và Sai lệch bám của robot tương ứng với bộ điều khiển bền vững thích nghi nơ ron (ARNNs), mờ thích nghi (AF) và bộ điều khiển tỉ lệ tích phân vi phân (PID)



Hình 5. Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Vị trí, Mô men điều khiển và Sai lệch bám của robot tương ứng với bộ điều khiển bền vững thích nghi nơ ron (ARNNs), mờ thích nghi (AF) và bộ điều khiển tỉ lệ tích phân vi phân (PID)

6. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, bộ điều khiển thích nghi bền vững được xây dựng trên cơ sở của bộ điều khiển trượt bền vững thích nghi nơ ron (ARNNs) để điều khiển cho robot ba khớp đã đạt được độ bám chính xác cao trong môi trường làm việc khác nhau. Trên cơ sở thuyết ổn định Lyapunov, các tác giả đã chứng minh được hệ thống luôn luôn ổn định trên toàn vùng làm việc. Hiệu quả của bộ điều khiển đã được kiểm chứng qua mô phỏng và được so sánh với bộ điều khiển PID và bộ điều khiển mờ thích nghi (AF) [12]. Quan sát kết quả mô phỏng chúng ta thấy rằng khả năng bám, sai lệch bám của bộ điều khiển đưa ra tốt hơn bộ điều khiển PID và bộ điều khiển AF. Từ kết quả mô phỏng chúng

ta có thể tiếp tục nghiên cứu để đưa vào thực nghiệm cũng như được ứng dụng vào thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Vicente Parra-Vega, Suguru Arimoto, Yun-Hui Liu, Gerhard Hirzinger, Prasad Akella, 2003. *Dynamic Sliding PID Control for Tracking of Robot Manipulators: Theory and Experiments*. IEEE Trans. on robotics and automation, vol 19(6), pp. 967-976

[2]. E. M. Jafarov, M. N. A. Parlakçı, Y. I Stefanopoulos, 2005. *A New Variable Structure PID-Controller Design for Robot Manipulators*. IEEE Trans. on control systems technology, Vol 13(1), pp. 122- 130.

[3]. Man Zhihong, M. Palaniswami, 1994. *Robust tracking control for rigid robotic manipulators*. IEEE Trans. Automat. Contr. vol. 39, no. 1, pp. 154 – 159.

[4]. R. G. Morgan, U. Ozguner, 1985. *A decentralised variable structure control algorithm for robotic manipulators*. IEEE J. Robotics Automat., vol. 1, pp. 57 - 65.

[5]. Man Zhihong, M. Palaniswami, 1993. *A variable structure model reference adaptive control for nonlinear robotic manipulators*. Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, vol. 7, pp.539 - 562.

[6]. A. Sabanovic, 2011. *Variable structure systems with sliding modes in motion control- A Survey*. IEEE Trans. Ind. Electron., 7 (2), pp. 212–223

[7]. P.S. Londhe, Yogesh Singh, M. Santhakumar, B.M. Patre, L.M. Waghmare, 2016. *Robust nonlinear PID-like fuzzy logic control of a planar parallel (2PRP-PPR) manipulator*. ISA Transactions 63, 218-232.

[8]. Zhou S. S., Feng G., Feng C. B., 2005. *Robust control for a class of uncertain nonlinear systems: Adaptive fuzzy approach based on backstepping*. Fuzzy Sets and Systems, 151(1), pp. 1–20.

[9]. Yuan Chen, Kangling Wang, Longying Zhai, Jun Gao, 2017. *Feedforward fuzzy trajectory compensator with robust adaptive observer at input trajectory level for uncertain multi-link robot manipulators*. Journal of the Franklin institute. Pp. 1-30

[10]. Yang Y. S., Feng G., Ren J. S., 2004. *A combined backstepping and small gain approach to robust adaptive fuzzy control for strict-feedback nonlinear systems*. IEEE Trans. Syst., Man Cybern. A, Syst., Humans, 34(3), pp.406–420.

[11]. Mai T L, Wang Y N, 2014. *Adaptive position tracking control system based on recurrent fuzzy wavelet neural networks for robot manipulator*. Journal of Systems and Control Engineering.

[12]. Li T S, Tong S C, Feng G, 2010. *A novel robust adaptive fuzzy tracking control for a class of nonlinear MIMO systems*. EEE Trans. Fuzzy syst, Vol.18, No.1, pp.150-160.

AUTHORS INFORMATION

Vu Thi Yen, Pham Van Cuong

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry