

BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI NƠ RON TRÊN CƠ SỞ CỦA CÔNG NGHỆ CUỐN CHIẾU CHO TAY MÁY

ADAPTIVE ROBUST NEURAL NETWORK CONTROLLER BASIS ON BACKSTEPPING FOR ROBOT MANIPULATORS

Vũ Thị Yến*, Trần Đức Hiệp,
Phạm Thế Vũ, Phạm Trung Hiếu

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đưa ra một bộ điều khiển bền vững thích nghi nơ ron (ARNNs) trên cơ sở của công nghệ điều khiển cuốn chiếu cho cánh tay máy robot để cải thiện vị trí bám. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển là sự kết hợp những thuận lợi của mạng nơ ron hướng tâm, điều khiển trượt và công nghệ điều khiển cuốn chiếu. Bộ điều khiển RBFNNs được sử dụng xấp xỉ hàm chưa rõ để giải quyết sự mở rộng của nhiễu và hàm phi tuyến chưa rõ. Hơn thế nữa, nhiễu của hệ thống được bù bởi bộ điều khiển trượt. Tất cả các tham số của bộ điều khiển được xác định bằng thuyết ổn định Lyapunov. Chúng được thay đổi online trên các luật học thích nghi. Do đó, tính ổn định và bền vững và hiệu suất bám yêu cầu của bộ điều khiển ARNNs cho cánh tay máy robot đạt được khả năng bền vững và hiệu suất của bộ điều khiển ARNNs được chứng minh bằng việc thực hiện mô phỏng trên cánh tay máy robot 3 bậc tự do.

Từ khóa: Robot người máy; mạng nơ ron; điều khiển bền vững thích nghi; điều khiển trượt.

ABSTRACT

This present study proposes an Adaptive Robust Neural Networks (ARNNs) based on backstepping control method for industrial robot manipulators (IRMs) in order to improve high correctness of the position tracking control. In this research, the ARNNs controller is combined the advantages of Radial Basis Function Neural Networks (RBFNNs), the robust term and adaptive backstepping control technique. The NNs is used in order to approximate the unknown function to deal with external disturbances and uncertain nonlinearities. In addition, the disturbance of system is compensated by the robust Sliding Mode Control (SMC). All the parameters of ARNNs are determined by the Lyapunov stability theorem. They are tuned online by the adaptive training laws. Therefore, the stability, robustness and desired tracking performance of ARNNs for IRMs are guaranteed. The robustness and effectiveness of the ARNNs are proved by the simulations performed on the three-link IRMs.

Keywords: Robot manipulators; neural network; sliding mode control; robust adaptive control.

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: havi2203@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/01/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/6/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2021

CHỮ VIẾT TẮT

IRMs: Industrial Robot Manipulators

SMC: Sliding Mode Control

RBFNNs: Radial Basis Function Neural Networks

ARNNs: Adaptive Robust Neural Networks

PID: Proportional Integral Differential

AF: Adaptive Fuzzy

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Với sự ra đời của cách mạng công nghiệp 4.0, sản xuất thông minh ngày càng được chú trọng và phát triển. Do đó nghiên cứu các bộ điều khiển để điều khiển cho robot công nghiệp được quan tâm. Tuy nhiên, robot công nghiệp là một đối tượng phi tuyến, trong quá trình làm việc, nó luôn chịu tác động của nhiễu vì vậy vấn đề đặt ra là việc thiết kế một bộ điều khiển phù hợp gặp rất nhiều khó khăn. Đã có rất nhiều bộ điều khiển cho robot đã được đưa ra như điều khiển PID, điều khiển thích nghi, điều khiển trượt,... đã được đưa ra trong tài liệu [1-6]. Ngày nay các bộ điều khiển thông minh trên cơ sở của điều khiển mờ và mạng nơ ron đã được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển robot công nghiệp. 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 bền vững thích nghi để điều khiển cho đối tượng phi tuyến. Ở đây, tác giả đã kết hợp các thuận lợi của bộ điều khiển mờ, điều khiển trượt và bộ điều khiển thích nghi để điều khiển cho đối tượng phi tuyến. Bộ điều khiển mờ được sử dụng để xấp xỉ động lực học chưa rõ của hệ thống phi tuyến và bộ điều khiển đưa ra đã đảm bảo được tính ổn định và hiệu suất bám theo yêu cầu. Tuy nhiên, bộ điều khiển mờ được xây dựng trên các luật điều khiển và các luật điều khiển ở đây chủ yếu được xây dựng trên kinh nghiệm của người thiết kế. Do đó, với những kiến thức kinh nghiệm đó nhiều khi chưa đủ và rất khó để xây dựng được luật điều khiển tối ưu. Để giải quyết vấn đề này, bộ điều khiển thông minh trên cơ sở của mạng nơ ron được đưa ra [11-17]. Trong tài liệu [11], một bộ điều khiển thích nghi nơ ron được đưa ra điều khiển cho cánh tay robot. Ở đây bộ điều khiển nơ ron được sử dụng để xấp xỉ động lực học chưa rõ

của robot. Ngoài ra các tham số của bộ điều khiển được xác định trên cơ sở của thuyết ổn định Lyapunov. Hơn thế nữa, các tham số này được điều chỉnh online trong quá trình làm việc bằng các luật thích nghi. Bộ điều khiển đưa ra đã đảm bảo được khả năng ổn định và hiệu suất điều khiển yêu cầu. Bằng việc kế thừa các ưu điểm của bộ điều khiển nơ ron, bài báo này đưa ra bộ điều khiển nơ ron trên cơ sở của công nghệ điều khiển cuốn chiếu để điều khiển cho cánh tay robot công nghiệp.

2. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ROBOT

Xét phương trình động lực học của cánh tay robot được đưa ra như sau [11]:

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

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 lực ly tâm và ma trận gia tốc 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 [4]:

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

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

ở đây $m_0 > 0$ 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. BỘ ĐIỀU KHIỂN CUỐN CHIẾU

Bộ điều khiển cuốn chiếu cho động lực học của robot công nghiệp được mô tả như sau [7]:

Bước 1: $z_{q1}(t)$, $\dot{z}_{q1}(t)$ là vector sai lệch bám và đạo hàm của vector sai lệch được định nghĩa như sau:

$$z_{q1}(t) = q_d - q \text{ và } \dot{z}_{q1}(t) = \dot{q}_d - \dot{q} \tag{5}$$

Bằng việc sử dụng \dot{q} như là đầu ra điều khiển ảo đầu tiên. Định nghĩa một hàm như:

$$\alpha_{q1}(t) = \dot{q}_d + \lambda_{q1} z_{q1} \text{ và } \dot{\alpha}_{q1}(t) = \ddot{q}_d + \lambda_{q1} \dot{z}_{q1} \tag{6}$$

Với $\lambda_{q1} > 0$

Hàm theo Lyapunov đầu tiên L_1 được chọn như sau:

$$L_{q1}(z_{q1}(t)) = \frac{1}{2} z_{q1}^T z_{q1} \tag{7}$$

Vector sai lệch bám $z_{q2}(t)$ được định nghĩa như sau:

$$z_{q2}(t) = \alpha_{q1}(t) - \dot{q} = \dot{z}_{q1} + \lambda_{q1} z_{q1} \tag{8}$$

Đạo hàm của $L_{q1}(z_{q1}(t))$ được tính như sau:

$$\dot{L}_{q1}(z_{q1}(t)) = z_{q1}^T \dot{z}_{q1} = z_{q1}^T (z_{q2}(t) - \lambda_{q1} z_{q1}) \tag{9}$$

Bước 2: đạo hàm $z_{q2}(t)$ theo thời gian, ta có:

$$\dot{z}_{q2}(t) = \dot{\alpha}_{q1}(t) - \ddot{q} \tag{10}$$

Ở đây, \ddot{q} được sử dụng giống như đầu vào điều khiển ảo thứ 2.

Thay công thức (5, 6, 8 và 10) vào (1), ta có:

$$M\dot{z}_{q2} = M\dot{\alpha}_{q1} + C\alpha_{q1} - Cz_{q2} + G + F + \tau_d - \tau \tag{11}$$

Hàm thứ 2 theo Lyapunov L_2 chọn như sau:

$$L_{q2}(z_{q1}, z_{q2}) = L_{q1}(z_{q1}(t)) + \frac{1}{2} z_{q2}^T M z_{q2} \tag{12}$$

Đạo hàm theo thời gian của L_2 là:

$$\begin{aligned} \dot{L}_{q2}(z_{q1}, z_{q2}) &= z_{q1}^T (z_{q2}(t) - \lambda_{q1} z_{q1}) \\ &+ \frac{1}{2} z_{q2}^T \dot{M} z_{q2} + z_{q2}^T M \dot{z}_{q2} \end{aligned} \tag{13}$$

Thay công thức (11) vào (13) và sử dụng giả thuyết 2, ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}_{q2} &= z_{q1}^T (z_{q2}(t) - \lambda_{q1} z_{q1}) + \frac{1}{2} z_{q2}^T \dot{M} z_{q2} \\ &+ z_{q2}^T (M\dot{\alpha}_{q1} + C\alpha_{q1} - Cz_{q2} + G + F + \tau_d - \tau) \\ \dot{L}_{q2} &= z_{q1}^T z_{q2}(t) - z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} + z_{q2}^T (y + \tau_d - \tau) \end{aligned} \tag{14}$$

Với

$$y = M\dot{\alpha}_{q1} + C\alpha_{q1} + G + F \tag{15}$$

Luật điều khiển thích nghi được chọn như sau:

$$\tau = y + \lambda_{q2} z_{q2} + z_{q1} + \tau_d \tag{16}$$

Với $\lambda_{q2} > 0$

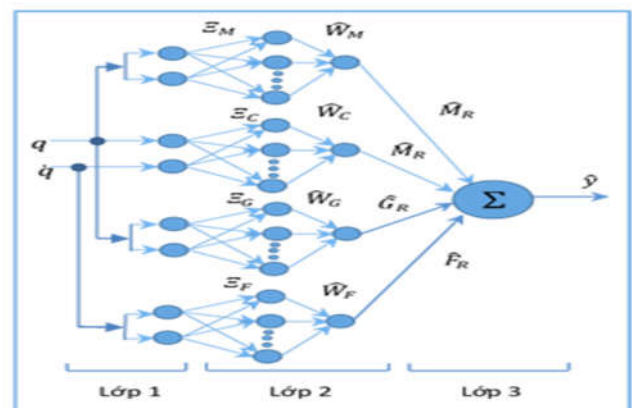
Thay công thức (16) vào công thức (14), ta có:

$$\dot{L}_{q2} = -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \tag{17}$$

Từ công thức (17), ta thấy $\dot{L}_{q2} < 0$, do đó $\dot{L}_{q2}(z_{q1}(t), z_{q2}(t)) < \dot{L}_{q2}(z_{q1}(0), z_{q2}(0))$. Vậy hệ thống ổn định không phụ thuộc vào z .

4. CẤU TRÚC BỘ ĐIỀU KHIỂN RBFNNs

Cấu trúc bộ điều khiển RBFNNs được đưa ra trong hình 1, nó bao gồm 3 lớp: lớp 1 (đầu vào - Input layer), Lớp 2 (lớp ẩn - Hidden layer), Lớp 3 (Lớp đầu ra - Output layer) [12].



Hình 1. Cấu trúc của RBFNN

Giả thiết rằng $M(q), C(q, \dot{q}), G(q), F(\dot{q})$ là giá trị đầu ra của bộ điều khiển RBFNNs và chúng được xác định tương ứng như sau:

$$M(q) = M_R(q) + \Gamma_M = W_M^T * \Xi_M(q) + \Gamma_M \quad (18)$$

$$C(q, \dot{q}) = C_R(q, \dot{q}) + \Gamma_C = W_C^T * \Xi_C(q, \dot{q}) + \Gamma_C \quad (19)$$

$$G(q) = G_R(q) + \Gamma_G = W_G^T * \Xi_G(q) + \Gamma_G \quad (20)$$

$$F(\dot{q}) = F_R(\dot{q}) + \Gamma_F = W_F^T * \Xi_F(\dot{q}) + \Gamma_F \quad (21)$$

Ở đây, W_M, W_C, W_G là giá trị trọng số tối ưu của bộ điều khiển. h_M, h_C, h_G là đầu ra của lớp ẩn. E_M, E_C, E_G là sai của W_M, W_C, W_G tương ứng và được giới hạn. Giá trị đánh giá của $M_R(q), C_R(q, \dot{q}), G_R(q)$ được xác định theo công thức sau:

$$\hat{M}_R(q) = \hat{W}_M^T * \Xi_M \quad (22)$$

$$\hat{C}_R(q, \dot{q}) = \hat{W}_C^T * \Xi_C \quad (23)$$

$$\hat{G}_R(q) = \hat{W}_G^T * \Xi_G \quad (24)$$

$$\hat{F}_R(\dot{q}) = \hat{W}_F^T * \Xi_F \quad (25)$$

Trong đó: $\hat{M}_R, \hat{C}_R, \hat{G}_R, \hat{F}_R$ là giá trị đánh giá của $M_R(q), C_R(q, \dot{q}), G_R(q)$ và $\hat{W}_M, \hat{W}_C, \hat{W}_G$, và \hat{W}_F là giá trị đánh giá của W_M, W_C, W_G và W_F .

5. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VÀ PHÂN TÍCH TÍNH ỔN ĐỊNH

5.1. Thiết kế bộ điều khiển

Robot dưới sự tác động của lực τ và ở đây bộ điều khiển được thiết kế sao cho 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 được thiết kế như hình 2.

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

$$\tau = \hat{y} + \lambda_{q2}z_{q2} + z_{q1} + \hat{\tau}_{SMC} \quad (26)$$

Ở đây, $\hat{\tau}_{SMC}$ là bộ điều khiển trượt và \hat{y} là giá trị xấp xỉ của hàm y .

Thay công thức (6) và công thức (18-21) vào công thức (15), công thức (15) có thể viết lại như sau:

$$\begin{aligned} y &= (W_M^T * \Xi_M(q) + \Gamma_M)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) \\ &\quad + (W_C^T * \Xi_C(q, \dot{q}) + \Gamma_C)(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) \\ &\quad + W_G^T * \Xi_G(q) + \Gamma_G + W_F^T * \Xi_F(\dot{q}) + \Gamma_F \\ y &= W_M^T * \Xi_M(q)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) + \Gamma_M(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) \\ &\quad + W_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) \\ &\quad + \Gamma_C(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) + W_G^T * \Xi_G(q) + \Gamma_G \\ &\quad + W_F^T * \Xi_F(\dot{q}) + \Gamma_F \\ y &= W_M^T * \Xi_M(q)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) \\ &\quad + W_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) \\ &\quad + W_G^T * \Xi_G(q) + W_F^T * \Xi_F(\dot{q}) + \Gamma \end{aligned} \quad (27)$$

Ở đây:

$$\Gamma = \Gamma_M(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) + \Gamma_C(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) + \Gamma_G + \Gamma_F$$

Giá trị xấp xỉ của đầu ra bộ điều khiển y được tính toán như sau:

$$\hat{y} = \hat{M}\dot{\alpha}_{q1} + \hat{C}\alpha_{q1} + \hat{G} + \hat{F} \quad (28)$$

Sử dụng công thức (6) và công thức (22-25), công thức (28) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \hat{W}_M^T * \Xi_M(q)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1}) \\ &\quad + \hat{W}_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1}) \\ &\quad + \hat{W}_G^T * \Xi_G(q) + \hat{W}_F^T * \Xi_F(\dot{q}) \end{aligned} \quad (29)$$

Bộ điều khiển trượt được thiết kế như sau:

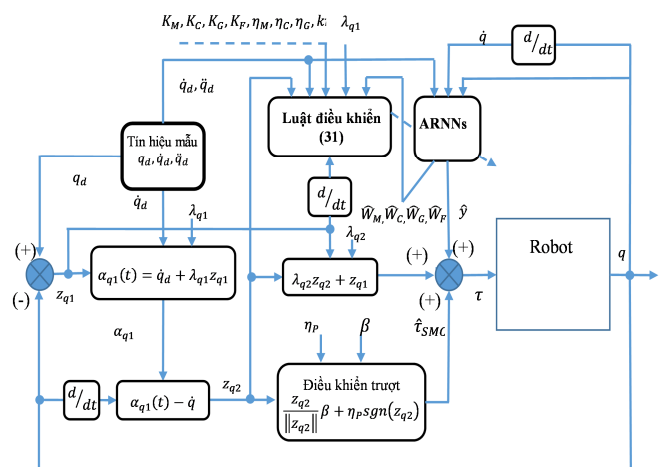
$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{SMC} &= \frac{z_{q2}}{z_{q2}} \left(\frac{\eta_M W_M^2}{4} + \frac{\eta_C W_C^2}{4} + \frac{\eta_G W_G^2}{4} + \frac{\eta_F W_F^2}{4} \right) \\ &\quad + \eta_P \text{sgn}(z_{q2}) = \frac{z_{q2}}{z_{q2}} \beta + \eta_P \text{sgn}(z_{q2}) \end{aligned} \quad (30)$$

Ở đây: $\beta = \frac{\eta_M W_M^2}{4} + \frac{\eta_C W_C^2}{4} + \frac{\eta_G W_G^2}{4} + \frac{\eta_F W_F^2}{4}$, $\eta_P \geq \|\Gamma + \tau_d\|$

Với việc phân tích ở trên, luật học của bộ điều khiển được chọn như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}}_M = K_M \Xi_M(q)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1}\dot{z}_{q1})z_{q2}^T - \eta_M K_M z_{q2} \hat{W}_M \\ \dot{\hat{W}}_C = K_C \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1}z_{q1})z_{q2}^T - \eta_C K_C z_{q2} \hat{W}_C \\ \dot{\hat{W}}_G = K_G \Xi_G(q)z_{q2}^T - \eta_G K_G z_{q2} \hat{W}_G \\ \dot{\hat{W}}_F = K_F \Xi_F(\dot{q})z_{q2}^T - \eta_F K_F z_{q2} \hat{W}_F \end{cases} \quad (31)$$

Ở đây: $K_M, K_C, K_G, K_F, \eta_M, \eta_C, \eta_G, \eta_F$ là hàng số dương và hàng số đường chéo của ma trận.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển robot

5.2. Phân tích tính ổn định

Xét robot n link có phương trình động học như phương trình (1) và bộ điều khiển RBFNNs có luật thích nghi như công thức (26). Phân tích tính ổn định của hệ thống theo thuyết Lyapunov.

Xét hàm Lyapunov có phương trình như sau:

$$\begin{aligned} L(t) &= \frac{1}{2} z_{q1}^T z_{q1} + \frac{1}{2} z_{q2}^T M z_{q2} \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\text{tr}(\tilde{W}_M^T K_M^{-1} \tilde{W}_M) + \text{tr}(\tilde{W}_C^T K_C^{-1} \tilde{W}_C) \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\text{tr}(\tilde{W}_G^T K_G^{-1} \tilde{W}_G) + \text{tr}(\tilde{W}_F^T K_F^{-1} \tilde{W}_F) \right) \end{aligned} \quad (32)$$

Ở đây: $\tilde{W}_M = W_M - \hat{W}_M, \tilde{W}_C = W_C - \hat{W}_C,$

$$\tilde{W}_G = W_G - \hat{W}_G, \tilde{W}_F = W_F - \hat{W}_F$$

Đạo hàm theo thời gian của $L(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & z_{q1}^T \dot{z}_{q1} + \frac{1}{2} z_{q2}^T \dot{M} z_{q2} + z_{q2}^T M \dot{z}_{q2} \\ & + \text{tr}(\tilde{W}_M^T K_M^{-1} \dot{\tilde{W}}_M) + \text{tr}(\tilde{W}_C^T K_C^{-1} \dot{\tilde{W}}_C) \\ & + \text{tr}(\tilde{W}_G^T K_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_G) + \text{tr}(\tilde{W}_F^T K_F^{-1} \dot{\tilde{W}}_F) \end{aligned} \quad (33)$$

Thay công thức (11) và sử dụng giả thuyết 2 vào công thức (33), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & z_{q1}^T z_{q2}(t) - z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} + z_{q2}^T (y + \tau_d - \tau) \\ & + \text{tr}(\tilde{W}_M^T K_M^{-1} \dot{\tilde{W}}_M) + \text{tr}(\tilde{W}_C^T K_C^{-1} \dot{\tilde{W}}_C) \\ & + \text{tr}(\tilde{W}_G^T K_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_G) + \text{tr}(\tilde{W}_F^T K_F^{-1} \dot{\tilde{W}}_F) \end{aligned} \quad (34)$$

Thay công thức (26), (27), (29), (31), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \\ & + \tilde{W}_M^T * \Xi_M(q)(\ddot{q}_d + \lambda_{q1} \dot{z}_{q1}) z_{q2}^T \\ & + \tilde{W}_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1} z_{q1}) z_{q2}^T \\ & + \tilde{W}_G^T * \Xi_G(q) z_{q2}^T + \tilde{W}_F^T * \Xi_F(\dot{q}) z_{q2}^T + (\Gamma + \tau_d) z_{q2}^T \\ & - \hat{\tau}_{SMC} z_{q2}^T - \text{tr}(\tilde{W}_M^T K_M^{-1} \dot{\tilde{W}}_M) - \text{tr}(\tilde{W}_C^T K_C^{-1} \dot{\tilde{W}}_C) \\ & - \text{tr}(\tilde{W}_G^T K_G^{-1} \dot{\tilde{W}}_G) - \text{tr}(\tilde{W}_F^T K_F^{-1} \dot{\tilde{W}}_F) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \\ & + \tilde{W}_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1} z_{q1}) z_{q2}^T \\ & + \tilde{W}_G^T * \Xi_G(q) z_{q2}^T + \tilde{W}_F^T * \Xi_F(\dot{q}) z_{q2}^T \\ & + (\Gamma + \tau_d) z_{q2}^T + \eta_M z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_M^T (W_M - \tilde{W}_M) \\ & + \eta_C z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_C^T (W_C - \tilde{W}_C) \\ & + \eta_G z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_G^T (W_G - \tilde{W}_G) \\ & + \eta_F z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_F^T (W_F - \tilde{W}_F) - \hat{\tau}_{SMC} z_{q2}^T \end{aligned} \quad (35)$$

Sử dụng định luật

$$\text{tr} \tilde{W}^T (W - \tilde{W}) = (\tilde{W}, W) - \|\tilde{W}\|^2 \leq \|\tilde{W}\| \|W\| - \|\tilde{W}\|^2$$

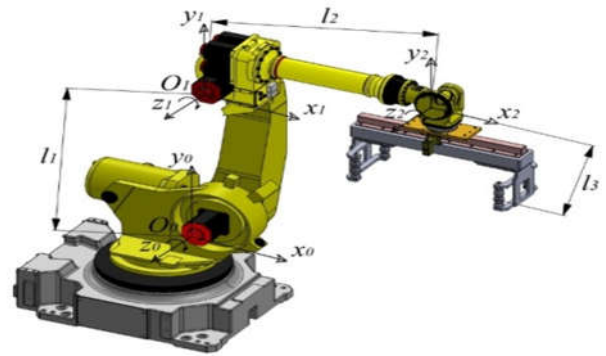
Và thay thế công thức (30) vào công thức (35), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \\ & + \tilde{W}_C^T * \Xi_C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda_{q1} z_{q1}) z_{q2}^T \\ & + \tilde{W}_G^T * \Xi_G(q) z_{q2}^T + \tilde{W}_F^T * \Xi_F(\dot{q}) z_{q2}^T \\ & + (\Gamma + \tau_d) z_{q2}^T + \eta_M z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_M^T (W_M - \tilde{W}_M) \\ & + \eta_C z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_C^T (W_C - \tilde{W}_C) \\ & + \eta_G z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_G^T (W_G - \tilde{W}_G) \\ & + \eta_F z_{q2} \text{tr} \tilde{W}_F^T (W_F - \tilde{W}_F) - \hat{\tau}_{SMC} z_{q2}^T \\ \dot{L}(t) \leq & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} + (\Gamma + \tau_d) z_{q2}^T \\ & + \eta_M \|z_{q2}\| (\|W_M\| \|\tilde{W}_M\| - \|\tilde{W}_M\|^2) \\ & + \eta_C \|z_{q2}\| (\|W_C\| \|\tilde{W}_C\| - \|\tilde{W}_C\|^2) \\ & + \eta_G \|z_{q2}\| (\|W_G\| \|\tilde{W}_G\| - \|\tilde{W}_G\|^2) \\ & + \eta_F \|z_{q2}\| (\|W_F\| \|\tilde{W}_F\| - \|\tilde{W}_F\|^2) \\ & - z_{q2}^T \frac{z_{q2}}{\|z_{q2}\|} \beta - z_{q2}^T \eta_P \text{sgn}(z_{q2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) \leq & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \\ & - \eta_M \|z_{q2}\| \left(\frac{W_M}{2} - \|\tilde{W}_M\| \right)^2 \\ & - \eta_C \|z_{q2}\| \left(\frac{W_C}{2} - \|\tilde{W}_C\| \right)^2 \\ & - \eta_G \|z_{q2}\| \left(\frac{W_G}{2} - \|\tilde{W}_G\| \right)^2 \\ & - \eta_F \|z_{q2}\| \left(\frac{W_F}{2} - \|\tilde{W}_F\| \right)^2 \\ \dot{L}(t) \leq & -z_{q1}^T \lambda_{q1} z_{q1} - z_{q2}^T \lambda_{q2} z_{q2} \end{aligned} \quad (36)$$

Ta thấy $\dot{L}(t) \leq 0$, do đó hệ thống ổn định không phụ thuộc vào z .

6. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



Hình 3. Robot 3 bậc tự do

Phương trình động học của robot (hình 3) như sau:

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

$$\begin{aligned} M_{11} = & (m_1 + m_2 + m_3) l_1^2 + (m_2 + m_3) l_2^2 + m_3 l_3^2 \\ & + 2(m_2 + m_3) l_1 l_2 \cos(q_2) \\ & + 2m_3 l_1 l_3 \cos(q_2 + q_3) + 2m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{12} = & (m_2 + m_3) l_2^2 + m_3 l_3^2 + (m_2 + m_3) l_1 l_2 \cos(q_2) \\ & + m_3 l_1 l_3 \cos(q_2 + q_3) + 2m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{13} = & m_3 l_3^2 + m_3 l_1 l_3 \cos(q_2 + q_3) + m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{21} = & M_{12} \\ M_{22} = & (m_2 + m_3) l_2^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{23} = & m_3 l_3^2 + m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{31} = & m_3 l_3^2 + m_3 l_1 l_3 \cos(q_2 + q_3) + m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \\ M_{32} = & M_{23} \\ M_{33} = & m_3 l_3^2 \\ C_{11} = & -2(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ & - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\ & - 2m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ C_{12} = & -(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\ & - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2) - 2m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) \dot{q}_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{13} &= -m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) \dot{q}_3 \\
 C_{21} &= -(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\
 &\quad - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\
 &\quad + (m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) (\dot{q}_2 + \dot{q}_1) \\
 &\quad + m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3) \\
 C_{22} &= -2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\
 C_{23} &= -m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\
 C_{31} &= -m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\
 &\quad - m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\
 &\quad + m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3) \\
 &\quad + m_3 l_2 l_3 \sin(q_2 + q_3) (2\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3) \\
 C_{32} &= m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_2 \\
 C_{33} &= 0; \\
 G_1 &= (m_1 + m_2 + m_3) g l_1 \sin(q_1) \\
 &\quad + (m_2 + m_3) g l_2 \sin(q_1 + q_2) \\
 &\quad + m_3 g l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\
 G_2 &= (m_2 + m_3) g l_2 \sin(q_1 + q_2) \\
 &\quad + m_3 g l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\
 G_3 &= m_3 g l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)
 \end{aligned}$$

Ở đây, p_1, p_2, p_3 là trọng lượng của các link, l_1, l_2, l_3 là chiều dài của các link và $g = 10(m/s^2)$.

Các thông số của các link robot như sau:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 4,5 \text{ (kg)}, p_2 = 3,2 \text{ (kg)}, p_3 = 1,6 \text{ (kg)}; \\
 l_1 &= 450 \text{ (mm)}, l_2 = 340 \text{ (mm)}, l_3 = 220 \text{ (mm)};
 \end{aligned}$$

Giá trị vị trí mẫu của các link được chọn như sau:

$$\begin{aligned}
 q_d &= [q_{d1} \quad q_{d2} \quad q_{d3}]^T \\
 &= [\sin(1,5t) \quad 0,5 \sin(2t) \quad \sin(1,5t)]^T;
 \end{aligned}$$

Mô phỏng một vài trường hợp như sau:

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

$$\tau_o = \begin{bmatrix} 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \end{bmatrix}; F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 2\text{sign}(\dot{q}_1) \\ 2\text{sign}(\dot{q}_2) \\ 2\text{sign}(\dot{q}_3) \end{bmatrix}$$

Các thông số của bộ điều khiển:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{q1} &= \text{diag}(80, 80, 80); \lambda_{q2} = \text{diag}(40, 40, 40); \\
 K_M &= K_C = K_G = K_F = \text{diag}(15, 25, 25, 20);
 \end{aligned}$$

$$\eta_M = \eta_C = \eta_G = \eta_F = 0,5;$$

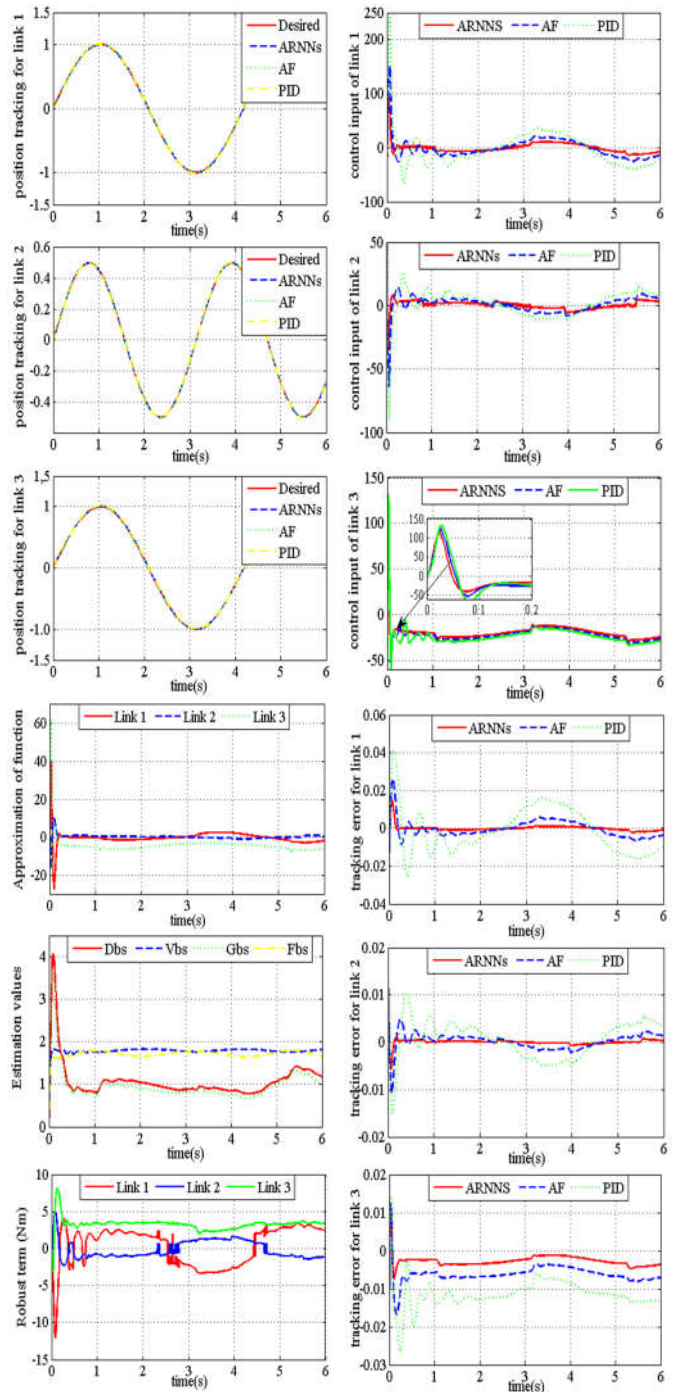
$$\eta_P = \text{diag}(0,5; 0,07; 0,05);$$

Bảng 1. Thông số quá độ của hệ thống

Link	Thời gian xác lập (s)	Sai số xác lập
1	0,2	$3,136 \cdot 10^{-4}$
2	0,3	$3,243 \cdot 10^{-4}$
3	0,35	$5,968 \cdot 10^{-3}$

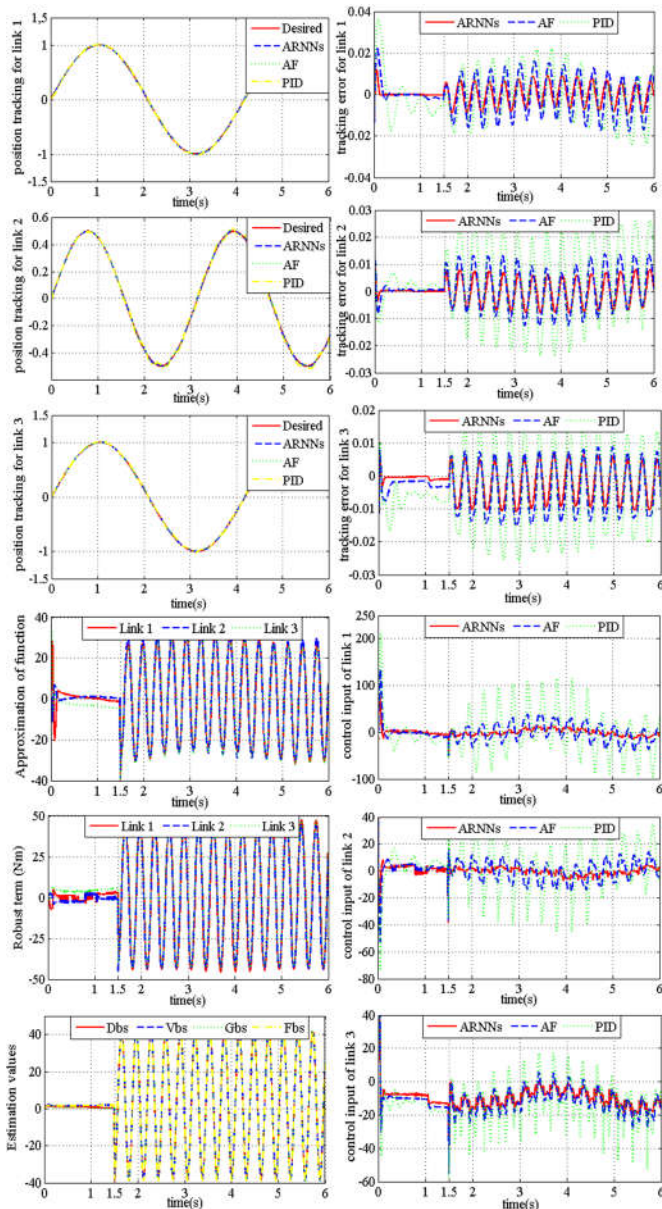
Trường hợp 2: Hệ thống đang làm việc sau thời gian 1,5s ta đưa thêm nhiễu có dạng như sau:

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



Hình 4. Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Vị trí, sai lệch bám, mô men điều khiển của các link robot tương ứng với các bộ điều khiển ARNNs, AF, PID. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt và hàm xấp xỉ của ARNNs

Nhận xét: Từ kết quả mô phỏng hình 4 và 5 thấy rằng cả ba bộ điều khiển PID, AF và ARNNs đều đảm bảo tính ổn định và bền vững trong quá trình làm việc. Tuy nhiên, qua kết quả mô phỏng hình 4, 5 cho thấy mô men điều khiển của bộ điều khiển ARNNs hội tụ nhanh hơn, sai lệch bám và mô men điều khiển cũng nhỏ hơn hai bộ điều khiển còn lại. 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.



Hình 5. Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Vị trí, sai lệch bám, mô men điều khiển của các link robot tương ứng với các bộ điều khiển ARNNs, AF, PID. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt và hàm xấp xỉ của ARNNs

7. KẾT LUẬN

Bài báo này đưa ra một bộ điều khiển thích nghi bền vững nơ ron trên cơ sở thuật toán điều khiển cuốn chiếu để điều khiển cho robot 3 link đảm bảo được độ chính xác trong các môi trường làm việc khác nhau. Trên cơ sở thuyết ổn định Lyapunov, nhóm 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. 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]. I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, A. S. Morse, 1991. *Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems*. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 36, no. 11, pp. 1241-1253.

[3]. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, 1995. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York: Wiley.

[4]. R. A. Freeman, P. V. Kokotovic, 1996. *Robust Nonlinear Control Design*. Boston, MA: Birkhäuser.

[5]. B. Yao, M. Tomizuka, 1997. *Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form*. Automatica, vol. 33, no. 5, pp. 893-900.

[6]. Z. P. Jiang, L. Praly, 1998. *Design of robust adaptive controllers for nonlinear systems with dynamic uncertainties*. Automatica, vol. 34, no. 7, pp. 825-840.

[7]. Y. S. Yang, C. J. Zhou, 2005. *Adaptive fuzzy stabilization for strict-feedback canonical nonlinear systems via backstepping and smallgain approach*. IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 13, no. 1, pp. 104-114.

[8]. Tong S. C., Li H. X., 2003. *Fuzzy Adaptive Sliding Mode Control for MIMO Nonlinear Systems*. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 11(3): 354-360.

[9]. Y. Zhang, P. Y. Peng, Z. P. Jiang, 2000. *Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping*. IEEE Trans. Neural Netw., vol. 11, no. 6, pp. 1347-1360.

[10]. S. S. Zhou, G. Feng, C. B. Feng, 2005. *Robust control for a class of uncertain nonlinear systems: Adaptive fuzzy approach based on backstepping*. Fuzzy Sets Syst., vol. 151, no. 1, pp. 1-20.

[11]. He W., Chen Y., Yin Z., 2016. *Adaptive Neural Network Control of an Uncertain Robot With Full-State Constraints*. IEEE Transactions on Cybernetics, 46(3): 620-629.

[12]. Rong H. J., Wei J. T., Bai J. M., et al., 2015. *Adaptive Neural Control for a Class of MIMO Nonlinear Systems with Extreme Learning Machine*. Neurocomputing, 149, 405-414.

[13]. Kern J., Jamett M., Urrea C., et al., 2014. *Development of a neural controller applied in a 5 DOF robot redundant*. IEEE Latin America Transactions, 12(2): 98-106.

[14]. Sun C., He W., Ge W., et al., 2017. *Adaptive Neural Network Control of Biped Robots*. IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, 47(2): 315-326.

[15]. Zheng G., Zhou Y., Ju M., 2019. *Robust control of silicone soft robot using neural networks*. ISA Transactions the journal of Automation, 0578(19): 1-15.

[16]. Zhang D., Kong L., Zhang Q. L., Fu Q., 2020. *Neural network based Fixed Time control for a robot with uncertainties and input Deadzone*. Neurocomputing, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.01.072>

[17]. Yuncheng Ouyang, Lu Dong, Yanling Wei, Changyin Sun, 2020. *Neural Network Based Tracking Control for an Elastic Joint Robot With Input Constraint via Actor-Critic Design*. Neurocomputing, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.05.067>

AUTHORS INFORMATION

Vu Thi Yen, Tran Duc Hiep, Pham The Vu, Pham Trung Hieu
Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry