

DESIGN AN ADAPTIVE ROBUST CONTROL USING NEURAL NETWORKS FOR CLEANING AND DETECTING ROBOT MANIPULATOR

Vu Thi Yen^{1*}, Bui Van Huy¹, Le Anh Dai²

¹Hanoi University of Industry

²Hoa Binh Polytechnic College

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 09/3/2022	In this paper, an Adaptive Robust control using Neural Networks (ARNNs) is presented for Cleaning and Detecting Robot Manipulators (CLRM) in order to improve the position tracking performance. To deal with the unknown dynamics of the CLRM, the ARNNs are applied in order to approximate the unknown dynamics. In addition, the robust sliding mode control (SMC) is used to eliminate the disturbances of the cleaning and detecting robot manipulator control system, compensate the estimation error. The online adaptive training laws of the controller are determined based on Lyapunov stability theorem. Therefore, the tracking performance, robustness and stability of the ARNNs for the CLRM are guaranteed. Moreover, the simulations performed on two-link cleaning and detecting robot manipulators are provided to prove the efficiency and robustness of the ARNNs.
Revised: 23/5/2022	
Published: 25/5/2022	
KEYWORDS	
Sliding mode control	
Adaptive control	
Robust adaptive control	
Neural networks	
Robot manipulator	

THIẾT KẾ MỘT BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI SỬ DỤNG MẠNG NƠ RON CHO ROBOT TÌM VÀ LÀM SẠCH BẦ

Vũ Thị Yến^{1*}, Bùi Văn Huy¹, Lê Anh Đài²

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật công nghệ Hòa Bình

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 09/3/2022	Trong bài báo này, một bộ điều khiển bền vững thích nghi sử dụng mạng nơ ron (ARNNs) đã được đưa ra cho robot tìm và làm sạch vết bẩn (CLRM) để cải thiện hiệu suất bám. Để giải quyết thành phần bất định của động học CLRM, bộ điều khiển ARNNs được ứng dụng để xấp xỉ động lực học chưa rõ. Ngoài ra, bộ điều khiển trượt SMC được sử dụng để loại bỏ nhiễu của robot tìm và làm sạch bầm và bù sai lệch ước lượng. Các luật học thích nghi online được xác định trên cơ sở thuyết ổn định Lyapunov. Vì thế, hiệu suất bám, tính bền vững và khả năng ổn định của ARNNs cho CLRM đã được đảm bảo. Hơn thế nữa, mô phỏng hoạt động của bộ điều khiển được thực hiện trên robot tìm và làm sạch bầm hai bậc tự do để chứng minh hiệu quả và tính bền vững của bộ điều khiển ARNNs.
Ngày hoàn thiện: 23/5/2022	
Ngày đăng: 25/5/2022	
TỪ KHÓA	
Điều khiển trượt	
Điều khiển thích nghi	
Điều khiển bền vững thích nghi	
Mạng nơ ron	
Tay máy robot	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5658>

* Corresponding author. Email: yenvt@hau.edu.vn

1. Giới thiệu

Robot là một trong những đối tượng được sử dụng rộng rãi và mang lại hiệu quả cao trong sản xuất, sinh hoạt,... nhưng robot là đối tượng có tính phi tuyến mạnh, có các tham số bất định lớn và luôn có nhiễu tác động. Vì vậy, song song với việc nâng cao độ chính xác trong các khâu lắp ghép cơ khí thì điều khiển cũng là một vấn đề cần được quan tâm để cải thiện chất lượng làm việc của robot. Do đó, trong quá trình thiết kế bộ điều khiển đã phát sinh khó khăn cần phải giải quyết. Để giải quyết vấn đề này, trong thời gian qua đã có nhiều nhà nghiên cứu đã nghiên cứu và đề xuất các bộ điều khiển như điều khiển PID, điều khiển trượt, điều khiển thích nghi,... [1]-[6]. Bộ điều khiển thích nghi được tổng hợp để giúp hệ thống làm việc ổn định, dù cho trong quá trình làm việc của hệ thống có sự thay đổi của cấu trúc, xuất hiện nhiễu không mong muốn, hoặc tham số không biết trước của đối tượng điều khiển. Bộ điều khiển tự chỉnh định lại tham số và cấu trúc nhằm đảm bảo chất lượng hệ thống khi có sự thay đổi của đối tượng [6]. Điều khiển trượt là một phương pháp điều khiển phù hợp cho các đối tượng phi tuyến. Nó là phương pháp điều khiển có khả năng kháng nhiễu, ít nhạy với sự thay đổi các thông số của hệ thống và đáp ứng động học nhanh. Phương pháp điều khiển này tương đối đơn giản nhưng đem lại sự bền vững và hiệu quả cao. Tuy nhiên, điều khiển trượt gây ra hiện tượng dao động tần số cao quanh mặt trượt. Ngoài ra, khi thiết kế bộ điều khiển trượt cần phải biết trước mô hình toán học của đối tượng và các điều kiện biên [4]. Trong những năm gần đây, điều khiển thông minh sử dụng mạng nơ ron và logic mờ để điều khiển vị trí bám của tay máy robot được quan tâm. Bộ điều khiển mờ là một công cụ hiệu quả trong việc xấp xỉ hệ thống phi tuyến [7]-[12]. Trong [8], một bộ điều khiển mờ trên cơ sở điều khiển bền vững thích nghi điều khiển cho tay máy robot đã được đưa ra. Ở đây, logic mờ đã được sử dụng để ước lượng thành phần chưa rõ của động học robot. Sai lệch bám và hiệu quả bám đã được đảm bảo theo yêu cầu đặt ra khi sử dụng bộ điều khiển này. Tuy nhiên, luật điều khiển của bộ điều khiển mờ được xây dựng dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế. Vì vậy, nó rất khó để xây dựng được luật điều khiển tối ưu. Để giải quyết khó khăn này, bài báo đã đưa ra bộ điều khiển bền vững thích nghi nơ ron. Khi áp dụng bộ điều khiển này vào điều khiển robot tốc độ tụ và hiệu quả bám đã được cải thiện đáng kể.

2. Động lực học robot

Động lực học của tay máy n bậc tự do như sau [11]:

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

Ở đây: Các biến $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^{n \times 1}$ lần lượt là vị trí, tốc độ và gia tốc góc của các khớp. Véc tơ $\tau \in R^{n \times 1}$ là véc tơ mô men (lực) tác động lên các khớp. Ma trận $M(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận quán tính. Ma trận $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ là ma trận ly tâm và Coriolis. Véc tơ $G(q) \in R^{n \times 1}$ là một véc tơ mô tả thành phần trọng lượng. Véc tơ $F(\dot{q}) \in R^{n \times 1}$ là véc tơ mô tả thành phần ma sát. Véc tơ $\tau_d \in R^{n \times 1}$ là véc tơ nhiễu.

Phương trình động lực học (1) của robot phải thỏa mãn các tính chất sau:

Tính chất 1: $M(q)$ phải là một ma trận xác định dương và đối xứng:

$$M(q) \leq m_0 I \quad (2)$$

Với $m_0 > 0$, $m_0 \in R$

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

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

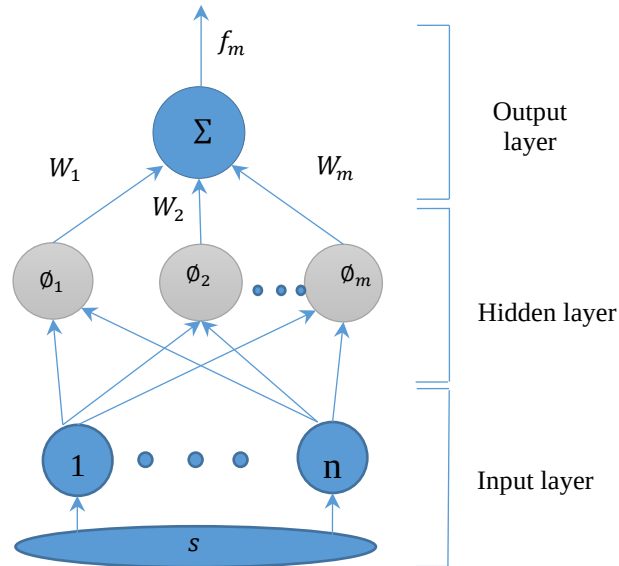
Tính chất 3: $C(q, \dot{q})\dot{q}$ được giới hạn như sau:

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

Với $C_k > 0$.

3. Cấu trúc của NNs

Cấu trúc bộ điều khiển nơ ron được mô tả trong hình 1 gồm 3 lớp [12].



Hình 1. Cấu trúc của NNs

Lớp thứ 1 (Input layer): được gọi là lớp đầu vào, trong đó $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$, là các biến đầu vào.

Lớp thứ 2 (The hidden layer): được gọi là lớp ẩn và đầu ra của lớp ẩn được tính toán như sau:

$$\phi_j(s) = \exp[-(s - c_j)^2 / (2d_j^2)] \quad (5)$$

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

Lớp thứ 3 (Output layer): được gọi là lớp đầu ra và được tính theo công thức sau:

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

Trong đó: W_{ji} là trọng số giữa nơ ron của lớp ẩn thứ j và nơ ron của lớp đầu ra thứ i , n là số đầu vào.

Viết lại công thức (6) ta có:

$$f(s) = W\phi(s) \quad (7)$$

Trong đó: W là trọng số của mạng nơ ron, $\phi(s) = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$

Ở đây chúng ta sử dụng mạng nơ ron để xấp xỉ. Do đó, nó sẽ tồn tại một hàm nơ ron tối ưu như sau:

$$f(s) = W^* \phi(s) + \delta \quad (8)$$

Ở đây: Giá trị trọng số tối ưu là W^* , và véc tơ sai lệch xấp xỉ là δ .

Giả thiết: Sai lệch xấp xỉ được giới hạn:

$$\|\delta\| \leq \delta_0 \quad (9)$$

Trong đó, δ_0 là giá trị thực dương.

Đầu ra của bộ điều khiển nơ ron là một hàm xấp xỉ và được xác định như sau:

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

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

Robot nhiều thanh nối là một hệ phi tuyến MIMO, có các tương tác chéo thể hiện rõ nét. Vì vậy việc xác định chính xác các thông số của mô hình robot công nghiệp gặp nhiều khó khăn, do sự phức tạp trong việc xác định giá trị về khối lượng, mô men cũng như kích thước hình học của robot, ngoài ra các tham số còn có thể bị thay đổi phụ thuộc vào chế độ công tác của robot, do đó các tham số động học, động lực học của robot được coi là các tham số bất định. Mục tiêu điều khiển trong bài báo này là xây dựng bộ điều khiển bám quỹ đạo đặt trước cho mô hình bất định hàm số đảm bảo hệ kín ổn định và bền vững toàn cục, sai lệch bám tiến về không và không chịu ảnh hưởng của nhiễu.

Bộ điều khiển ARNNs cho robot tìm và làm sạch bồn có cấu trúc như hình 2:

$e(t)$ là sai lệch vị trí, và $\dot{e}(t)$ là sai lệch vận tốc của các khớp robot. Do đó, luật thích nghi được tính toán theo công thức sau:

$$e(t) = q_d - q \quad (11)$$

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

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

Đạo hàm (11) và thay (12) vào ta có:

$$\dot{q} = -s + \dot{q}_d + \lambda e \quad (13)$$

Ta có:

$$M\dot{s} = M(\ddot{q}_d - \ddot{q} + \lambda\dot{e}) = M(\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) - M\ddot{q} \quad (14)$$

Thay (1) vào (14) ta có:

$$\begin{aligned} M\dot{s} &= M(\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) - Cs + C(\dot{q}_d + \lambda e) + G + F + \tau_d - \tau \\ M\dot{s} &= -Cs - \tau + f + \tau_d \end{aligned} \quad (15)$$

Trong đó: $f(x) = M(\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) + C(\dot{q}_d + \lambda e) + G + F$

Trong thực tế $f(x)$ của mô hình không xác định. Do đó, cần phải xác định giá trị gần đúng của $f(x)$. Trong bài báo này, tác giả sử dụng mạng RBF (Radial Basis Function) nơ ron để ước lượng giá trị của $f(x)$. Tín hiệu vào của mạng nơ ron là: $x = [e^T \quad \dot{e}^T \quad q_d^T \quad \dot{q}_d^T \quad \ddot{q}_d^T]^T$.

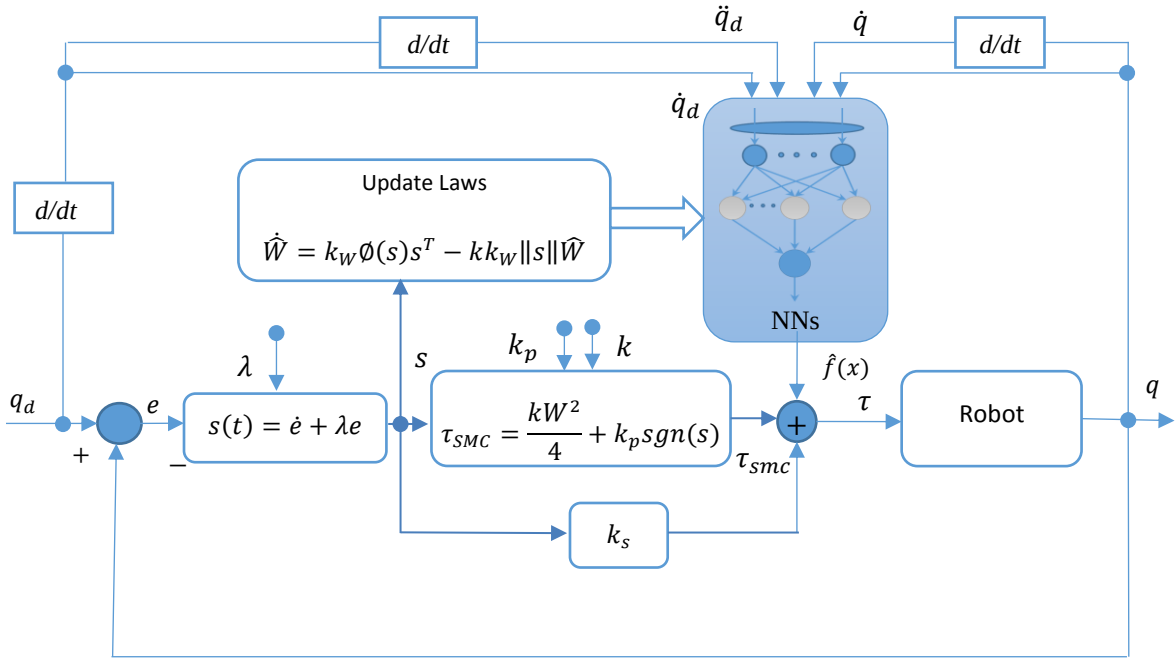
Từ sơ đồ cấu trúc hình 3 ta có:

$$\tau = \hat{f} + K_S s + \tau_{smc} \quad (16)$$

Ở đây: $\hat{f}$ là tín hiệu xấp xỉ đầu ra của NNs. τ_{smc} là bộ điều khiển trượt (SMC).

Bộ điều khiển trượt được lựa chọn như sau:

$$\tau_{smc} = \frac{k_W^2}{4} \frac{s}{\|s\|} + k_P \text{sgn}(s) \quad (17)$$



Hình 2. Hệ thống điều khiển robot tìm và làm sạch bản

Với $k_p \geq \delta_0 + \tau_d$

Luật học trong thiết kế này chọn như sau:

$$\dot{W} = k_W \phi(s) s^T - k k_W \|s\| \hat{W} \quad (18)$$

5. Chứng minh tính ổn định của bộ điều khiển

Ở đây tác giả chứng minh tính ổn định của hệ thống cho robot n bậc theo thuyết Lyapunov có phương trình động lực học đưa ra trong (1) và luật học đưa ra trong (18).

Hàm Lyapunov có phương trình như sau:

$$L(t) = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T k_W^{-1} \tilde{W}) \quad (19)$$

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

$$\dot{L}(t) = s^T M \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + \text{tr}(\tilde{W}^T k_W^{-1} \dot{\tilde{W}}) \quad (20)$$

Thay (15) vào (20) ta có:

$$\dot{L}(t) = s^T (-\tau + f + \tau_d) + \frac{1}{2} s^T (\dot{M} - 2C) s + \text{tr}(\tilde{W}^T k_W^{-1} \dot{\tilde{W}}) \quad (21)$$

Sử dụng tính chất 2 và thay công thức (16) vào (21) ta có:

$$\dot{L}(t) = -s^T K_S s + (\delta + \tau_d) s^T - s^T \tau_{smc} + \text{tr}(\tilde{W}^T (k_W^{-1} \dot{\tilde{W}} + \phi(s) s^T)) \quad (22)$$

Thay (18) vào (22) ta có:

$$\dot{L}(t) = -s^T K_S s + (\delta + \tau_d) s^T - s^T \tau_{smc} + \text{tr}(\tilde{W}^T (-\phi(s) s^T + k \|s\| \hat{W} + \phi(s) s^T)) \quad (23)$$

(23) có thể viết lại như sau:

$$\dot{L}(t) = -s^T K_S s + (\delta + \tau_d) s^T - s^T \tau_{smc} + k \|s\| \text{tr} \tilde{W}^T (W - \tilde{W}) \quad (24)$$

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

Do vậy chúng ta sẽ có bất đẳng thức:

$$\dot{L}(t) \leq -s^T K_S s + (\delta + \tau_d) s^T - s^T \tau_{smc} + k \|s\| (\|\tilde{W}\| \|W\| - \|\tilde{W}\|^2) \quad (25)$$

Thay (17) vào (25) ta có:

$$\dot{L}(t) \leq -s^T K_S s - k \|s\| \left(-\|\tilde{W}\| \|W\| + \|\tilde{W}\|^2 + \frac{W^2}{4} \right) \quad (26)$$

$$\dot{L}(t) \leq -s^T K_S s \quad (27)$$

Do đó

$$\dot{L}(t) \leq 0 \quad (28)$$

Từ (28) ta thấy $\dot{L}(s(t), \tilde{w}) \leq 0$ là hàm nghịch biến. $\dot{L}(s(t), \tilde{w}) \leq \dot{L}(s(0), \tilde{w})$ nếu tất cả các tham số như $s(t)$, $\tilde{w}$ được giới hạn tại $t=0$ và chúng vẫn bị ràng buộc khi $t \geq 0$. Định nghĩa $\varepsilon(t) \equiv -s^T K_S s$ và ta có $\varepsilon(t) \leq -\dot{L}$, và tích phân của $\varepsilon(t)$ có thể viết như sau:

$$\int_0^t \varepsilon(\nu) d\nu \leq L(s(0), \tilde{w}) - L(s(t), \tilde{w}) \quad (29)$$

Do $L(s(0), \tilde{w})$ là hàm giới hạn, và $L(s(t), \tilde{w})$ là hàm không tăng và có giới hạn, ta có kết luận sau.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \varepsilon(\nu) d\nu < \infty \quad (30)$$

Áp dụng bổ đề của Barbalat [12] $\dot{\varepsilon}(t)$ được giới hạn, nó có thể chứng minh rằng $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \varepsilon(\nu) d\nu = 0$, do đó $s(t)$ sẽ hội tụ về 0 khi $t \rightarrow \infty$

6. Kết quả mô phỏng

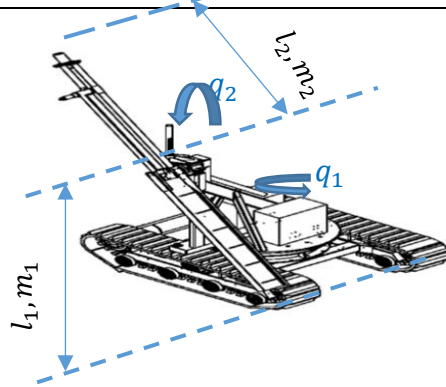
Tiến hành mô phỏng bộ điều khiển cho robot tìm và làm sạch bẩn trong hình 3.

Phương trình động học của robot như sau:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} M_{11} &= (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) \\ M_{12} &= M_{21} = m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) \\ M_{22} &= m_2 l_2^2 \\ C_{11} &= -m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ C_{12} &= -m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ C_{21} &= m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_1; C_{22} = 0 \\ G_1 &= (m_1 + m_2) g l_1 \cos(q_2) + m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ G_2 &= m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{aligned}$$



Hình 3. Robot tìm và làm sạch bãi

Ở đây m_1, m_2 là khối lượng của link1, link 2. l_1, l_2 , là chiều dài của link1, link 2. $g = 9,8(m/s)$ giá trị của gia tốc trọng trường. $q = [q_1 \ q_2]^T$ vị trí của link1, link2. Giá trị tín hiệu mẫu cho link1 và link2 được chọn là: $q_d = [q_{1d} \ q_{2d}]^T = [0.1 \sin(t) \ 0.1 \sin(t)]^T$

Vị trí ban đầu của các link $q_0 = [-0.1 \ 0.1]^T$, gia tốc ban đầu của các link $\ddot{q}_0 = [0.0 \ 0.0]^T$. Thông số của các link robot là: $m_1 = 2 \ (kg)$, $m_2 = 1 \ (kg)$, $l_1 = 0,8 \ (m)$, $l_2 = 1 \ (m)$.

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: $n, m, k_W, \lambda, k, K_s$

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, và trọng số của bộ điều khiển NNs, tính toán $s(t)$ theo công thức (12).

Bước 4: Tính toán đầu ra của bộ điều khiển NNs theo (10).

Bước 5: Điều chỉnh các giá trị trọng số của bộ điều khiển NNs theo công thức (18).

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

Trường hợp 1: Lựa chọn thông số mô phỏng như sau:

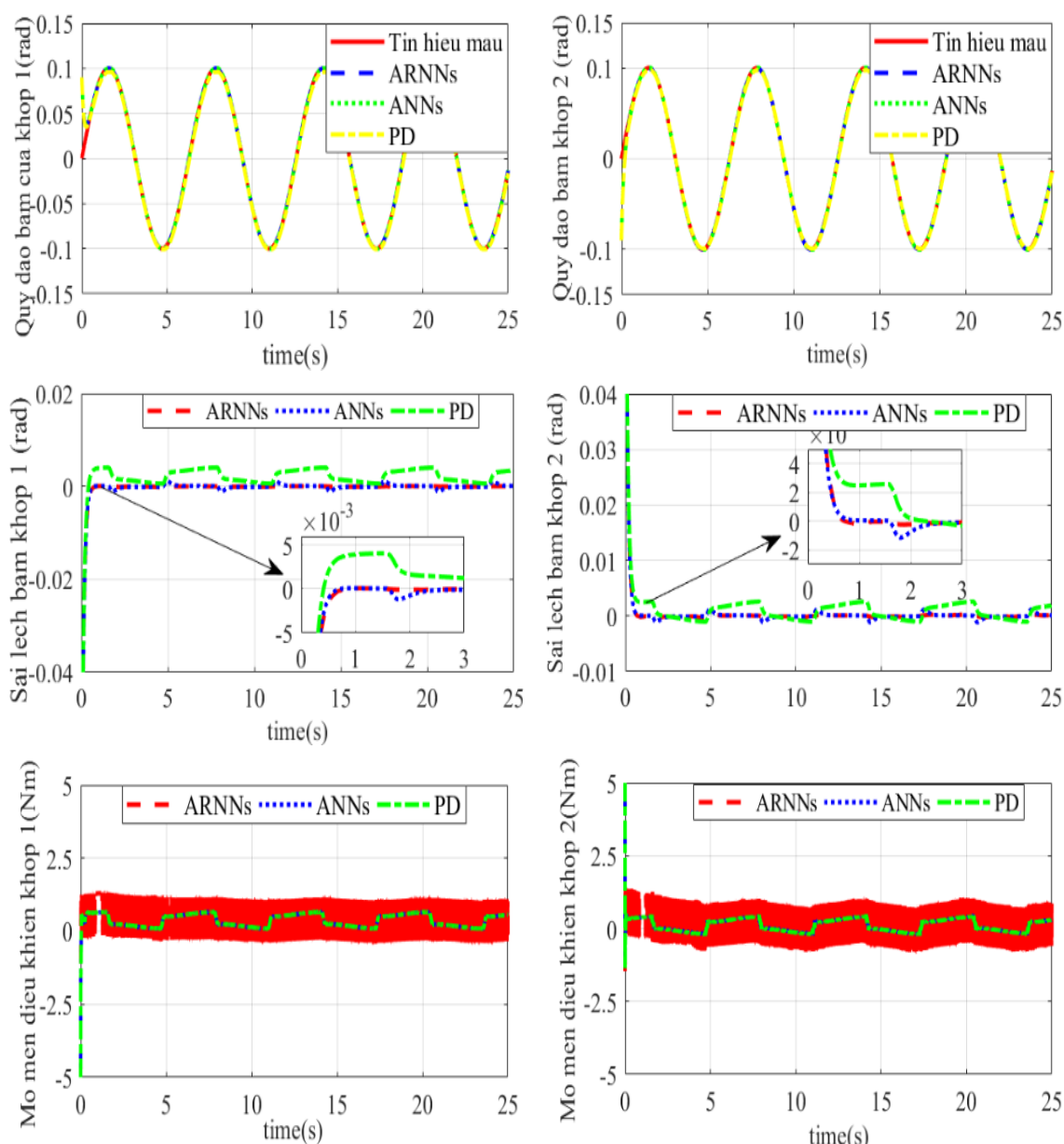
$$\tau_d = \begin{bmatrix} 0.1 \sin(t) \\ 0.1 \sin(t) \end{bmatrix}; F=0.2 * \text{sign}(\dot{q})$$

Hệ số khuếch đại trong luật thích nghi (3,17) $K_W = 15; k = 0,01, \lambda = \text{diag}[8, 8]; K_s = \text{diag}[20, 20];$

Cấu trúc bộ điều khiển nơ ron: $n=5, m=7$; Véc tơ trung tâm của mạng:

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

Độ lệch chuẩn của hàm xuyên tâm: $d = 10$



Hình 4. Trường hợp 1: Vị trí, sai lệch bám, mô men điều khiển các khớp của robot tương ứng với bộ điều khiển thích nghi bền vững mờ (ARNNs), thích nghi mờ (ANNs) và bộ điều khiển PD (Mô men điều khiển các khớp phiên dịch giả xem bản mẫu trên web sẽ rõ nét hơn)

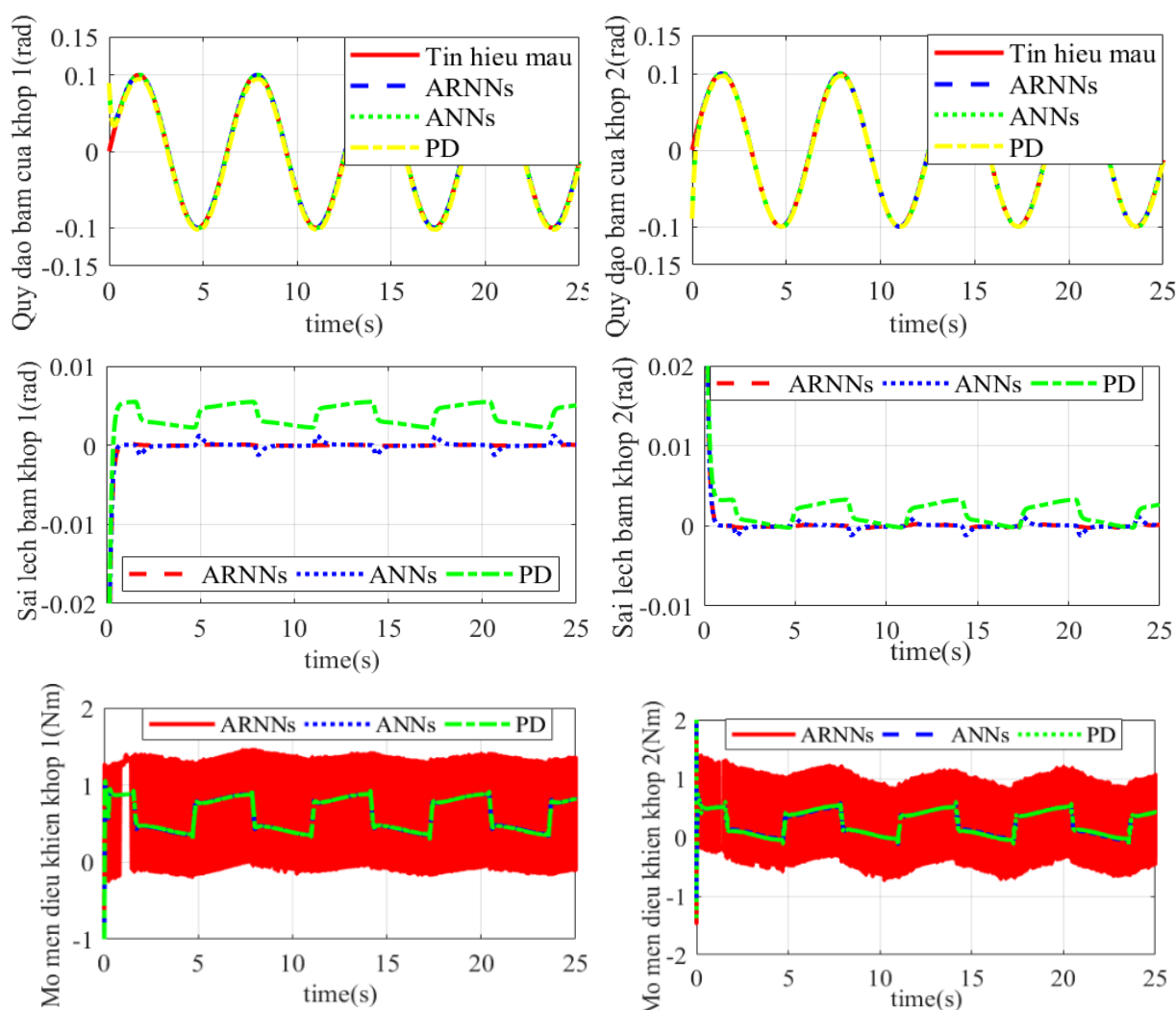
Trường hợp 2: Vẫn giữ nguyên các thông số mô phỏng ở trường hợp 1 và tăng tải trọng khớp 2 lên 0,5 kg

Nhận xét: Qua kết quả mô phỏng hình 4, 5 chúng ta thấy rằng, trong quá trình làm việc, hệ thống chịu tác động của nhiễu, sự thay đổi của ma sát hoặc tải trọng thay đổi bộ điều khiển ARNNs vẫn hội tụ, đảm bảo tính ổn định và bền vững trong quá trình làm việc. Hơn thế nữa, bằng việc sử dụng điều khiển trượt để bù sai lệch ước lượng cũng như trong quá trình làm việc các trọng số của bộ điều khiển mờ luôn luôn được cập nhật liên tục thông qua luật học, do đó sai lệch vị trí các khớp robot của bộ điều khiển ARNNs hội tụ nhanh hơn nhỏ hơn và ổn định hơn

2 bộ điều khiển còn lại. Qua đó chứng minh rằng chất lượng điều khiển robot tìm và làm sạch bồn bằng việc sử dụng bộ điều khiển ARNNs đã được cải thiện.

7. Kết luận

Trong bài báo này, bộ điều khiển thích nghi bền vững sử dụng bộ điều khiển nơ ron (ARNNs) cho robot tìm và làm sạch bồn đã đạt được độ chính xác. Dựa trên sự phân tích thuyết ổn định Lyapunov cho chúng ta thấy sự ổn định của hệ thống đạt được trên toàn vùng làm việc dưới tác động của nhiễu cũng như thành phần ma sát, hoặc tải trọng thay đổi trong quá trình làm việc. Kết quả mô phỏng kiểm chứng trên mô hình robot tìm và làm sạch bồn, được so sánh với bộ điều khiển ANNs và PD. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng bộ điều khiển ARNNs có khả năng kháng nhiễu tốt, sai lệch bám, độ ổn định tốt hơn 2 bộ điều khiển còn lại. Qua đó chúng ta có thể tiếp tục nghiên cứu để đưa vào thực nghiệm cũng như được ứng dụng vào thực tế.



Hình 5. Trường hợp 2: Vị trí, sai lệch bám, mô men điều khiển các khớp của robot tương ứng với bộ điều khiển thích nghi bền vững nơ ron (ARNNs), thích nghi nơ ron (ANNs) và bộ điều khiển PD (Mô men điều khiển các khớp phiên dịch giả xem bản mẫu trên web sẽ rõ nét hơn)

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. Huang and W. Lan, "Modified schenme of PID controllers for robot manipulators with an uncertain jacobian matrix," *IEEE International Conference on Control and Automation Christchurch, New Zealand*, 2009, pp.1925-1930.
- [2] P. Rocco, "Stability of PID control for industrial robot Arms," *IEEE Trans. on robotics and automation*, vol. 12, no. 4, pp. 606-614, 1996.
- [3] C. C. De Wit and N. Fixot, "Adaptive control of robot manipulator via velocity estimated feedback," *IEEE Transaction on automatic control*, vol. 37, no. 8, pp. 1234-1237, 1992.
- [4] S. Islam and X. P. Liu, "Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators," *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 58, no. 6, pp. 2444-2453, 2011.
- [5] C. H. Choi and N. Kwak, "Robust control of Robot Maniplator by Model Based Disturbance Attenuation," *IEEE/SAME Transactions on mechatronics*, vol. 8, no. 4, pp. 511-513, 2003.
- [6] D. P. Nguyen, *Advanced control theory*. Science and Technics Publishing House, 2009.
- [7] I. Shafiqul and X. L. Peter, "Robust Adaptive Fuzzy Output Feedback Control System for Robot Manipulators," *IEEE/SAME Transactions on mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 288-296, 2011.
- [8] Y. J. Liu, W. Wang, S. C. Tong *et al.*, "Robust adaptive tracking control for nonlinear systems based on bounds of fuzzy approximation parameters," *IEEE Transactions on Systems., Man, Cybernetics - part A, Systém and Humans*, vol. 40, no. 1, pp. 170-184, 2010.
- [9] T. Y. Vu, H. Q. Nguyen, and D. T. Le, "Design arobust adaptive sliding mode controller using neural network for industrial robot manipulator," *Scientific Reserch Journal, Sao Do University*, vol. 4, no. 63, pp. 35-41, 2018.
- [10] N. Agata, N. Marcin, and K. Andrzej, "Neural network control for robot manipulator," *20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, ,2019, pp.1-4.
- [11] Y. H. Kim and F. L. Lewis, "Neural Network Output Feedback Control of Robot Manipulators," *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. 15, no. 2, pp. 301-309, 1999.
- [12] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, Hoboken, NJ, 1991.