

Tổng hợp bộ điều khiển thích nghi bền vững trên cơ sở mạng nơron cho robot công nghiệp

Synthesis of Adaptive Robust Controller Based on Neural Network for Industrial Robot Manipulator

Lê Văn Chương¹, Đặng Thái Sơn¹, Mai Thế Anh¹, Dương Đình Tú¹,
Đình Văn Nam¹, Phan Văn Du¹, Hồ Sỹ Phương¹, Tạ Hùng Cường¹, Phan Văn Vỹ¹
¹Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh
Email: lvchuong85@gmail.com

Abstract

This article presents a method for synthesizing an adaptive robust controller based on a neural network for industrial robot manipulators with n degrees of freedom (n -DOF) in the case of uncertain changes in the robot's dynamics parameters and the impact of external disturbances. The uncertainty components are approximated by an RBF neural network with weights adjusted by adaptive control law to improve the ability to track a desired trajectory. In addition, a robust control component is added to eliminate the effects of approximation errors and unknown external disturbances affecting the system. Apply the proposed controller to the PUMA 560 industrial robot manipulator model; simulation results on Matlab Simulink software show that the robot control system proposed by the article has high quality, adaptability, and good interference resistance.

Keywords

Adaptive control; Robust control; RBF neural network; Robot manipulator.

Tóm tắt

Bài báo này trình bày phương pháp tổng hợp bộ điều khiển thích nghi bền vững trên cơ sở mạng nơron cho robot công nghiệp n bậc tự do (n -DOF) trong trường hợp các tham số động học của robot thay đổi bất định và tác động của nhiễu từ bên ngoài. Để nâng cao khả năng bám quỹ đạo cho trước, các thành phần bất định được xấp xỉ bằng mạng nơron RBF với các trọng số được hiệu chỉnh bằng luật điều khiển thích nghi. Bên cạnh đó, thành phần điều khiển bền vững được bổ sung để loại trừ ảnh hưởng của sai số xấp xỉ và nhiễu ngoài không biết trước tác động lên hệ thống. Áp dụng bộ điều khiển đã đề xuất cho mô hình robot công nghiệp PUMA 560, kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab cho thấy hệ thống điều khiển robot do bài báo đề xuất có chất lượng cao, khả năng thích nghi và kháng nhiễu tốt.

Ký hiệu

Ký hiệu	Ý nghĩa
q	Vector biến khớp
q_d	Vector quỹ đạo đặt
τ	Vector mômen đầu vào
M	Ma trận khối lượng suy rộng
C	Ma trận thành phần li tâm và Coriolis
g	Vector thành phần lực trọng trường
d	Vector nhiễu ngoài

Chữ viết tắt

DOF	Degrees of Freedom
AC	Adaptive Controller
RBF	Radial Basis Function
SMC	Sliding Mode Control

1. Đặt vấn đề

Robot đã và đang được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp và nhiều lĩnh vực khác do nhu cầu về chất lượng sản phẩm và năng suất lao động ngày càng cao. Việc nâng cao khả năng hoạt động chính xác cho robot đã trở thành một vấn đề bức thiết mà trong đó các luật điều khiển đóng một vai trò quan trọng. Với đặc tính động học phức tạp và tồn tại nhiều thành phần bất định, các nghiên cứu về tổng hợp hệ thống điều khiển cho robot thường tập trung vào việc sử dụng các phương pháp điều khiển hiện đại như điều khiển thích nghi, điều khiển bền vững trên cơ sở điều khiển trượt, điều khiển thông minh trên cơ sở logic mờ và mạng nơron.

Trong những năm gần đây phương pháp điều khiển thích nghi cho robot công nghiệp đã có nhiều kết quả được công bố trong [1]-[8]. Các tác giả [1] đã đề xuất bộ điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu cho robot công nghiệp có tham số bất định, độ bão hòa của bộ truyền động và phép đo của cảm biến lực không chính xác; luật thích nghi được sử dụng để ước lượng các tham số của robot được thiết kế trong không gian khớp nhằm giảm độ phức tạp trong tính toán. Trong [2], [3] các tác giả đã sử dụng phương pháp điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu cho các robot công nghiệp đơn giản có số bậc tự do nhỏ. Bộ điều khiển thích nghi mờ được đề xuất trong các nghiên cứu [4], [5] đã góp phần nâng cao chất lượng điều khiển cho robot, tuy vậy tồn tại của các bộ điều khiển này đó là phụ thuộc vào tri thức chuyên gia, do vậy việc ứng dụng vào vùng không có tri thức chuyên gia sẽ gặp nhiều khó khăn. Phương pháp điều khiển thích nghi trên cơ sở mạng nơron [6]-[8] là công cụ hiệu quả để tổng hợp các bộ điều khiển cho robot công nghiệp, mặc dù vậy, khi thiết kế các luật cập nhật thích nghi cho các mạng nơron cần quan tâm

đến phương pháp huấn luyện mạng và tốc độ hội tụ của thuật toán. Phương pháp điều khiển trượt được sử dụng cho robot công nghiệp mà không cần biết chính xác các tham số động học [9]-[11], tuy nhiên, phương pháp này tồn tại hiện tượng rung (chattering) có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến cấu trúc cơ học của robot. Để giảm hiện tượng chattering, các công trình [12]-[14] đã sử dụng phương pháp điều khiển trượt kết hợp với mạng neuron để ước lượng trực tuyến các tham số động học của đối tượng từ đó mang lại hiệu quả bám quỹ đạo với độ chính xác cao, chất lượng điều khiển được cải thiện.

Tiếp theo, bài báo trình bày giải pháp thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững trên cơ sở mạng neuron RBF cho robot công nghiệp có tính đến tham số thay đổi bất định và tác động của nhiễu từ bên ngoài. Bộ điều khiển đã đề xuất được áp dụng trên mô hình động học của robot công nghiệp PUMA 560 để đánh giá hiệu quả của các kết quả thu được.

2. Tổng hợp bộ điều khiển cho robot công nghiệp

Phương trình động lực học của robot công nghiệp n bậc tự do như sau [15], [16]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} + \mathbf{d}(t) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ là vectơ biến khớp; $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ là vectơ mômen đầu vào. $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận khối lượng suy rộng; $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận thành phần li tâm và Coriolis; $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^n$ là vectơ thành phần lực trọng trường; $\mathbf{d}(t) \in \mathbb{R}^n$ là vectơ nhiễu ngoài không biết trước và bị chặn $\|\mathbf{d}(t)\| \leq d_M$.

Vấn đặt ra là thiết kế bộ điều khiển để quỹ đạo của robot công nghiệp (1) bám theo quỹ đạo đặt mong muốn đồng thời đảm bảo khả năng thích nghi và kháng nhiễu tốt.

Sai lệch giữa quỹ đạo của robot công nghiệp (1) và quỹ đạo đặt mong muốn \mathbf{q}_d :

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}. \quad (2)$$

Mục tiêu của bộ điều khiển đó là đưa $\tilde{\mathbf{q}} \rightarrow 0$ và $\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

Hàm trượt được lựa chọn như sau [17], [18]:

$$\mathbf{s} = \lambda \tilde{\mathbf{q}} + \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \quad (3)$$

trong đó $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^n$, $\lambda \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận hằng số, $\lambda = \lambda^T > 0$. Từ (2) và (3) ta có:

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \dot{\mathbf{q}}_d + \lambda \tilde{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{s}}. \quad (4)$$

Tiếp tục biến đổi phương trình (4) ta có:

$$\mathbf{M}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \mathbf{M}[\dot{\mathbf{q}}_d + \lambda \tilde{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{s}}]. \quad (5)$$

Ta viết lại (5) thành:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{M}[\dot{\mathbf{q}}_d + \lambda \tilde{\mathbf{q}}] - \mathbf{M}\dot{\tilde{\mathbf{q}}}. \quad (6)$$

Từ (1) và (6) ta có phương trình động học của hệ thống như sau:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{f} + \mathbf{d}(t) - \mathbf{C}\mathbf{s} - \boldsymbol{\tau}, \quad (7)$$

trong đó: $\mathbf{f} = \mathbf{M}[\dot{\mathbf{q}}_d + \lambda \dot{\tilde{\mathbf{q}}}] + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}_d + \lambda \tilde{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}$,

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T.$$

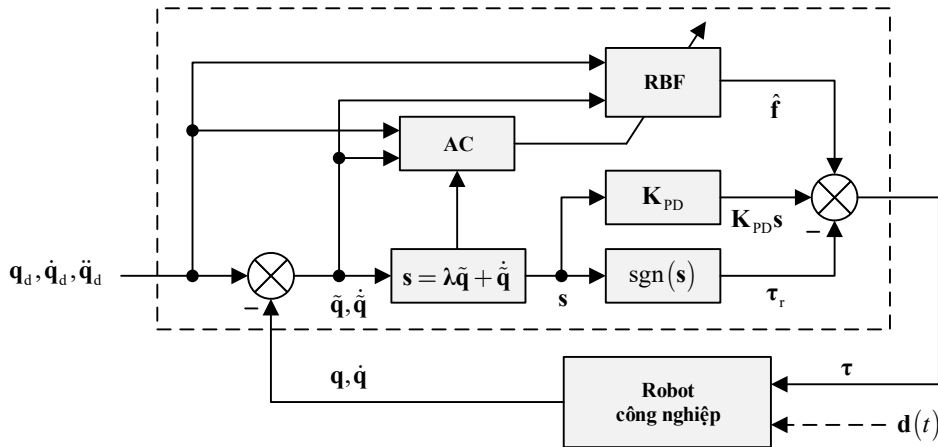
Luật điều khiển cho robot công nghiệp (1) được đề xuất như sau [17], [19], [20], [21]:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f} + \mathbf{K}_{PD}\mathbf{s} - \boldsymbol{\tau}_r, \quad (8)$$

trong đó $\mathbf{K}_{PD} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận hằng số thỏa mãn $\mathbf{K}_{PD} = \mathbf{K}_{PD}^T > 0$; $\boldsymbol{\tau}_r$ là thành phần điều khiển bền vững.

Trong thực tế, khi hoạt động robot công nghiệp (1) chịu tác động của nhiều yếu tố bất định như: sai lệch do cơ cấu chấp hành, chế độ công tác, tải trọng thay đổi,... kéo theo các tham số động học của robot thay đổi, do vậy thành phần \mathbf{f} là không biết trước. Do đó, để tổng hợp luật điều khiển, bài báo thực hiện xấp xỉ thành phần này bằng mạng neuron RBF.

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển cho robot công nghiệp (1) được thể hiện trên hình H.1. Trong đó: **AC** là khối điều khiển thích nghi; **RBF** là mạng neuron hàm cơ sở xuyên tâm; khối **K_{PD}** là thành phần điều khiển PD.



H.1 Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển robot công nghiệp

Ta biểu diễn các hàm phi tuyến f_i của vector \mathbf{f} như sau [22]:

$$f_i = \mathbf{w}_i^{*T} \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}_i) + \varepsilon_i, \quad (9)$$

trong đó $\mathbf{w}_i^* = [w_{i1}^*, w_{i2}^*, \dots, w_{iL}^*]^T$ với w_{ij}^* là các trọng số lý tưởng, $i = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, L}$ với L là số lượng hàm cơ sở đủ lớn để đảm bảo sai số xấp xỉ ε_i ; vector hàm cơ sở $\boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}_i) = [\varphi_{i1}(\mathbf{x}_i), \varphi_{i2}(\mathbf{x}_i), \dots, \varphi_{iL}(\mathbf{x}_i)]^T$ với các hàm cơ sở được chọn dưới dạng [22]:

$$\phi_{ij}(\mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{c}_{ij}\|^2}{2\sigma_{ij}^2}\right); \quad i = \overline{1, n}; \quad i = \overline{1, L}; \quad (10)$$

trong đó: $\mathbf{x}_i = [\tilde{q}_i \quad \dot{\tilde{q}}_i \quad q_{di} \quad \dot{q}_{di} \quad \ddot{q}_{di}]$ là vector đầu vào của mạng RBF; \mathbf{c}_{ij} là vector có chiều bằng chiều của vector \mathbf{x}_i , biểu diễn tâm của hàm cơ sở thứ i , σ_{ij} biểu diễn độ trải rộng của hàm cơ sở. Các trọng số lý tưởng w_{ij}^* không biết trước và cần phải đánh giá.

Khi đó:

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^{*T} \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{w}_n^{*T} \boldsymbol{\varphi}_n(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (11)$$

với $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$, $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \varepsilon_M$, ε_M là số dương nhỏ tùy ý cho trước.

Đánh giá của hàm f_i được thiết lập thông qua hàm cơ sở (10) và trọng số hiệu chỉnh \hat{w}_{ij} như sau:

$$\hat{f}_i = \hat{\mathbf{w}}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}_i), \quad (12)$$

trong đó $\hat{\mathbf{w}}_i = [\hat{w}_{i1}, \hat{w}_{i2}, \dots, \hat{w}_{iL}]^T$, $i = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, L}$.

$$\hat{\mathbf{f}} = [\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_n]^T = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}_1^T \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{w}}_n^T \boldsymbol{\varphi}_n(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Quá trình xấp xỉ hàm phi tuyến \hat{f}_i chính là quá trình hiệu chỉnh trọng số \hat{w}_{ij} so với trọng số lý tưởng w_{ij}^* . Sai lệch của trọng số hiệu chỉnh \hat{w}_{ij} so với trọng số lý tưởng w_{ij}^* là:

$$\tilde{w}_{ij} = w_{ij}^* - \hat{w}_{ij}. \quad (14)$$

Đặt:

$$\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_1^T \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{w}}_n^T \boldsymbol{\varphi}_n(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (15)$$

Từ (7), (14) và (15) ta có:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_1^T \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{w}}_n^T \boldsymbol{\varphi}_n(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix} - (\mathbf{C} + \mathbf{K}_{PD})\mathbf{s} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_r. \quad (16)$$

Tiếp tục biến đổi (16) ta thu được:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{1j} \varphi_{1j}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{nj} \varphi_{nj}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} - (\mathbf{C} + \mathbf{K}_{PD})\mathbf{s} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_r. \quad (17)$$

Với kết quả xấp xỉ vector \mathbf{f} , luật điều khiển (8) được viết lại như sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{f}} + \mathbf{K}_{PD}\mathbf{s} - \boldsymbol{\tau}_r, \quad (18)$$

trong đó thành phần điều khiển bền vững $\boldsymbol{\tau}_r$ được thiết kế để khắc phục sai số xấp xỉ của mạng nơron và tác động của nhiễu ngoài:

$$\boldsymbol{\tau}_r = -(\varepsilon_M + d_M) \text{sgn}(\mathbf{s}). \quad (19)$$

Với hệ (17), chọn hàm Lyapunov dạng:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M} \mathbf{s} + \frac{1}{2\gamma} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{ij}^2, \quad (20)$$

với γ là hệ số dương.

Lấy đạo hàm hai vế (20) ta có:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{s} + \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{ij} \dot{\tilde{w}}_{ij}. \quad (21)$$

Tiếp tục biến đổi (21) có chú ý đến (17):

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{s} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_{PD} \mathbf{s} + \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\tau}_r] + \mathbf{s}^T \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{1j} \varphi_{1j}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{nj} \varphi_{nj}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{ij} \dot{\tilde{w}}_{ij}. \quad (22)$$

Chú ý rằng đối với robot công nghiệp ta có $(\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C})$ là ma trận đối xứng lệch [15], [16], do đó $\mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{s} = 0$.

Tiếp tục biến đổi (22) ta có:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_{PD} \mathbf{s} + \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\tau}_r] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L s_i \tilde{w}_{ij} \varphi_{ij}(\mathbf{x}) + \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^L \tilde{w}_{ij} \dot{\tilde{w}}_{ij}. \quad (23)$$

Ta chọn:

$$\dot{\tilde{w}}_{ij} = -\gamma s_i \varphi_{ij}(\mathbf{x}), \quad i = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, L}. \quad (24)$$

Từ (14) và (24) ta có luật cập nhật thích nghi các trọng số của mạng nơron RBF như sau:

$$\dot{\hat{w}}_{ij} = \gamma s_i \varphi_{ij}(\mathbf{x}), \quad i = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, L}. \quad (25)$$

Từ (23) và (24) ta có:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_{PD} \mathbf{s} + \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\tau}_r]. \quad (26)$$

Mặt khác từ (19) ta có [21]:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t) + \boldsymbol{\tau}_r] &= \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t)] + \mathbf{s}^T \boldsymbol{\tau}_r \\ &= \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{d}(t)] - \|s\| (\varepsilon_M + d_M) \leq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Từ (26) và (27) ta có $\dot{V} \leq 0$ có nghĩa là hệ thống (17) ổn định.

Như vậy, trong phần này bài báo đã tổng hợp được bộ điều khiển cho robot công nghiệp (1) với luật điều khiển thể hiện theo biểu thức (18) và (19), luật cập nhật thích nghi các trọng số của mạng nơron RBF theo biểu thức (25).

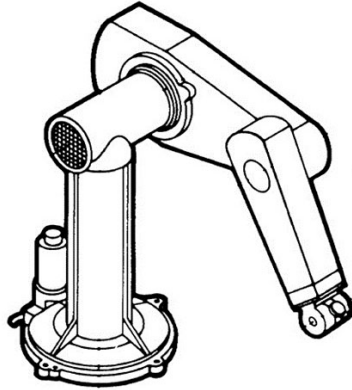
Có thể thấy tín hiệu điều khiển tạo ra thành phần điều khiển bền vững (19) là hàm không liên tục, điều này gây ra hiện tượng rung (chattering) trong hệ thống. Để giảm hiện tượng này có thể sử dụng các hàm thay thế gần đúng cho hàm sgn(.) trong (19) như: hàm khuếch đại bão hòa sat(.), hàm hyperbolic tangent tanh(.). Các hàm thay thế nói trên đều có dạng liên tục và do đó sẽ làm giảm tần số thay đổi dấu cho tín hiệu điều khiển.

Tiếp theo, bài báo thực hiện mô phỏng các kết quả thu được trên phần mềm Matlab-Simulink để minh chứng hiệu quả của bộ điều khiển đã đề xuất.

3. Mô phỏng và kiểm chứng kết quả

Thực hiện kiểm chứng bộ điều khiển đã đề xuất cho đối tượng robot công nghiệp PUMA 560 (6-DOF) có cấu trúc ở hình H.2 và các tham số động học được lấy từ tài liệu [23]. Mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab trong hai trường hợp:

- Trường hợp 1: Các tham số động học của robot PUMA 560 không thay đổi.
- Trường hợp 2: Các tham số động học của robot PUMA 560 có thay đổi trong khoảng 30%.



H. 2 Cấu trúc robot công nghiệp PUMA 560

Thành phần nhiễu tác động từ bên ngoài được giả thiết như sau:

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0.5 \sin(0.6t + 0.3) \\ 1.0 \cos(0.8t) + 0.1 \\ 0.1 \sin(0.9t + 0.5) \\ 0.8 \sin(0.8t + 0.6) \\ 0.3 \cos(0.2t) + 0.5 \\ 1.2 \sin(1.0t + 0.5) \end{bmatrix} \quad (27)$$

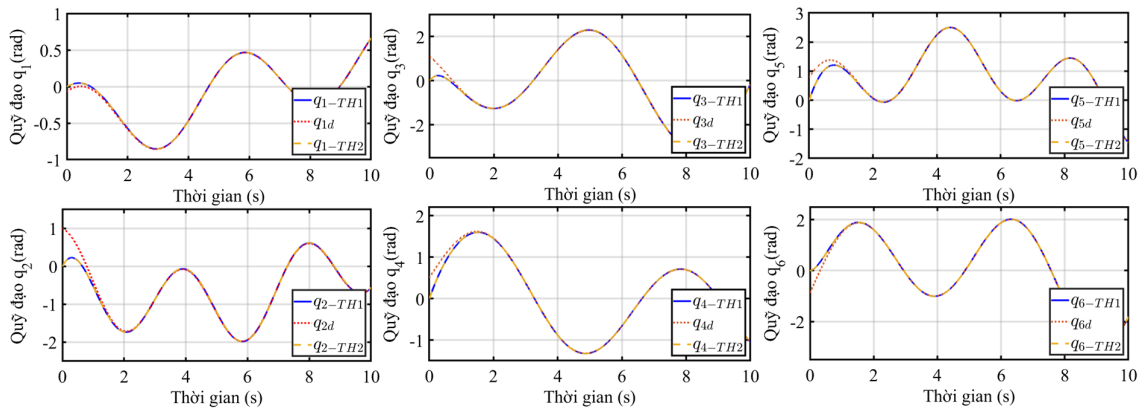
Quy đạo đặt cho robot PUMA 560 [23] được giả thiết như sau:

$$q_d = \begin{bmatrix} 0.5 \sin(1.2t + \pi/3) - 0.5 \sin(0.2t) \\ 1.0 \sin(1.6t + \pi/2) - 1.1 \sin(0.35) \\ 1.0 \sin(0.6t) - 2.2 \sin(1.0t - \pi/6) \\ 1.2 \sin(1.0t) + 0.5 \sin(0.38 + \pi/2) \\ 1.1 \sin(1.6t + \pi/4) + 1.4 \sin(0.35) \\ 2.0 \sin(1.2t) + 1.0 \sin(0.65 - \pi/3) \end{bmatrix} \quad (28)$$

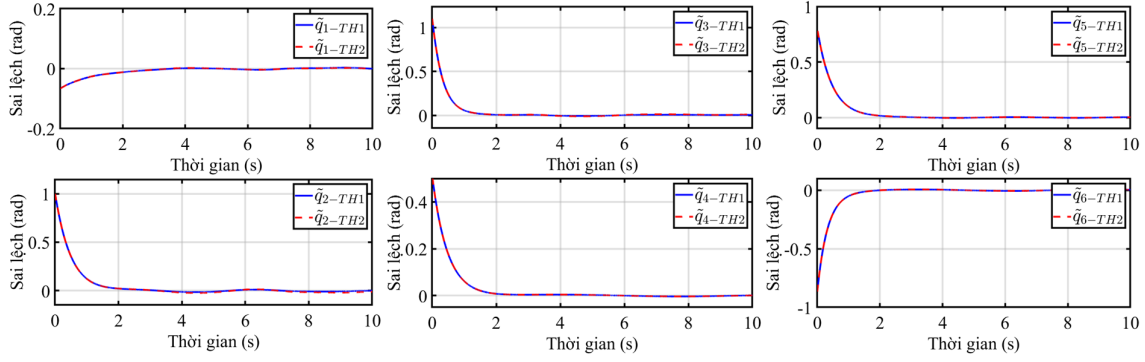
Áp dụng bộ điều khiển đã đề xuất, kết quả mô phỏng bám quỹ đạo đặt (28) của robot PUMA 560 được thể hiện trên hình H.3, sai lệch giữa quỹ đạo thực của robot và quỹ đạo đặt mong muốn (2) được thể hiện trên hình H.4; mômen đầu vào được thể hiện trên hình H.5.

Nhận xét: Kết quả mô phỏng trên hình H.3 cho thấy quỹ đạo của robot công nghiệp PUMA 560 đã bám chặt theo quỹ đạo đặt mong muốn với thời gian đáp ứng nhanh trong khoảng 1.5s trong cả hai trường hợp tham số động học cố định (TH1) và tham số thay đổi (TH2). Hình H.4 cho thấy sai lệch giữa quỹ đạo của robot và quỹ đạo đặt mong muốn đã tiệm cận về giá trị 0 trong cả hai trường hợp. Nhờ quá trình xấp xỉ trực tuyến các thành phần bất định của mạng nơron, hiện tượng chattering trong mômen điều khiển cũng đã được giảm thiểu thể hiện trên hình H.5. Hệ thống điều khiển đảm bảo tính thích nghi và bền vững trong điều kiện tham số động học của robot thay đổi bất định và tác động của nhiễu từ bên ngoài.

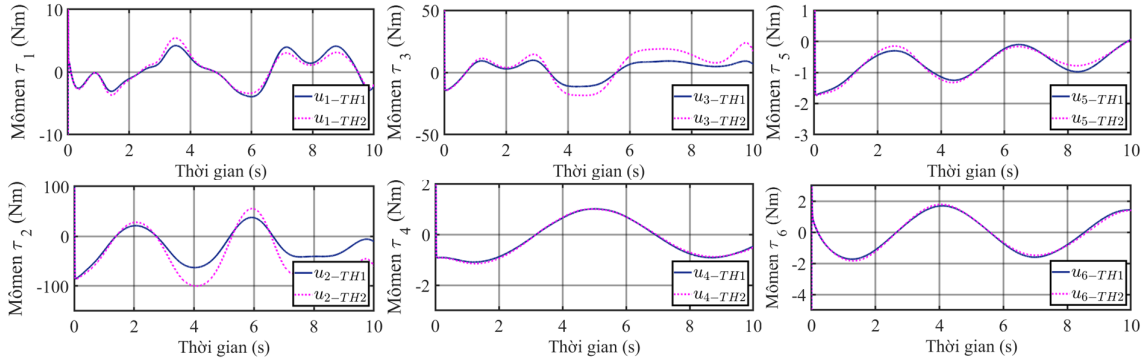
Các kết quả mô phỏng thu được ở trên đã một lần nữa minh chứng cho hiệu quả của bộ điều khiển do bài báo đã đề xuất.



H. 3 Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo đặt của robot công nghiệp PUMA 560



H. 4 Sai lệch giữa quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực của robot công nghiệp PUMA 560



H. 5 Mômen đầu vào của robot công nghiệp PUMA 560

4. Kết luận

Bài báo giới thiệu một bộ điều khiển thích nghi bền vững cho robot công nghiệp n-DOF và ứng dụng thành công trên mô hình robot PUMA 560 (6-DOF). Bộ điều khiển robot được tổng hợp trên cơ sở sơ đồ điều khiển PD để quỹ đạo của robot bám theo quỹ đạo mong muốn. Các thành phần thay đổi bất định trong động học robot được xấp xỉ và bù trừ bằng mạng nơron RBF với các trọng số của mạng được hiệu chỉnh bằng thuật toán thích nghi. Quá trình cập nhật các trọng số của mạng được thực hiện trực tuyến và được chứng minh tính ổn định bằng tiêu chuẩn Lyapunov. Thành phần điều khiển bền vững được bổ sung để loại trừ ảnh hưởng của sai số xấp xỉ của mạng nơron và tác động của nhiễu ngoài không biết trước. Các thuật toán điều khiển robot công nghiệp đã đề xuất đơn giản và dễ dàng thực hiện trong kỹ thuật, hệ thống điều khiển có khả năng thích nghi, kháng nhiễu tốt và chất lượng điều khiển cao. Kết quả mô phỏng một lần nữa minh chứng tính đúng đắn của bộ điều khiển được bài báo trình bày ở trên.

Tài liệu tham khảo

[1] Arefinia, E., Talebi, H. A., & Doustmohammadi, A. (2017), *A robust adaptive model reference impedance control of a robotic manipulator with actuator saturation*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 50(2), 409-420.

[2] Zhang, D., Wei, B. (2017) *A review on model reference adaptive control of robotic manipulators*, Annual Reviews in Control, 43, pp. 188-198.

[3] Tung, P. C., Wang, S. R., & Hong, F. Y. (2000) *Application of MRAC theory for adaptive control of a constrained robot manipulator*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(14), pp. 2083-2097.

[4] Fateh, S., Fateh, M. (2020) *Adaptive fuzzy control of robot manipulators with asymptotic tracking performance*, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 31(1), pp. 52-61.

[5] Chiou, K. C., & Huang, S. J. (2005) *An adaptive fuzzy controller for robot manipulators*, Mechatronics, 15(2), pp. 151-177.

[6] He, W., Huang, B., Dong, Y., Li, Z., & Su, C. Y. (2017) *Adaptive neural network control for robotic manipulators with unknown deadzone*, IEEE transactions on cybernetics, 48(9), pp. 2670-2682.

[7] Song, Q., Li, S., Bai, Q., Yang, J., Zhang, A., Zhang, X., & Zhe, L. (2021) *Trajectory planning of robot manipulator based on RBF neural network*, Entropy, 23(9), 1207.

[8] Le, P. N., & Kang, H. J. (2020) *Robot manipulator calibration using a model based identification technique and a neural network with the teaching learning-based optimization*, IEEE Access, 8, 105447-105454.

- [9] Adhikary, N., & Mahanta, C. (2018) *Sliding mode control of position commanded robot manipulators*, Control Engineering Practice, 81, pp. 183-198.
- [10] Piltan, F., & Sulaiman, N. B. (2012) *Review of sliding mode control of robotic manipulator*, World Applied Sciences Journal, 18(12).
- [11] Islam, S., & Liu, X. P. (2010) *Robust sliding mode control for robot manipulators*, IEEE Transactions on industrial electronics, 58(6), pp. 2444-2453.
- [12] Wu, H., Zhang, X., Song, L., Zhang, Y., Wang, C., Zhao, X., & Gu, L. (2023) *Parallel Network-Based Sliding Mode Tracking Control for Robotic Manipulators with Uncertain Dynamics*, Actuators. 12 (5).
- [13] Yu, J. (2023), *Trajectory tracking based on neural network sliding mode controller*, Authorea Preprints.
- [14] Hu, J., Zhang, D., Wu, Z. G., & Li, H. (2023), *Neural network-based adaptive second-order sliding mode control for uncertain manipulator systems with input saturation*, ISA transactions, 136, pp. 126-138.
- [15] Nguyễn Văn Khang, Chu Anh Mỹ (2011) *Cơ sở robot công nghiệp*, NXB Giáo dục Việt Nam.
- [16] Lewis, F. L., Dawson, D. M., & Abdallah, C. T. (2003), *Robot manipulator control: theory and practice*, CRC Press.
- [17] Ganie, I., Jagannathan, S. (2022), *Adaptive control of robotic manipulators using deep neural networks*, IFAC-PapersOnLine, 55(15), pp. 148-153.
- [18] T. Ngo, Y. Wang, T.L. Mai, M.H. Nguyen, J. Chen (2012) *Robust Adaptive Neural-Fuzzy Network Tracking Control for Robot Manipulator*, International Journal of Computers Communications & Control, 7(2), pp. 341-352.
- [19] Gierlak, P. (2021), *Adaptive position/force control of a robotic manipulator in contact with a flexible and uncertain environment*, Robotics, 10(1), 32.
- [20] Bao, Y., Thesma, V., & Velni, J. M. (2021), *Physics-guided and neural network learning-based sliding mode control*, IFAC-PapersOnLine, 54(20), 705-710.
- [21] Lewis FL, Liu K, Yesildirek A (1995) *Neural Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance*. IEEE Transactions on Neural Networks, 6(3), pp. 703-715.
- [22] Huang, S. N., Tan, K. K., Lee, T. H. (2001) *A combined PID/adaptive controller for a class of nonlinear systems*, Automatica, 37(4), pp. 611-618.
- [23] Lavín-Delgado, J.E., Solís-Pérez, J.E., Gómez-Aguilar, J.F., Escobar-Jiménez, R.F. (2020) *Trajectory tracking control based on non-singular fractional derivatives for the PUMA 560 robot arm*, Multibody Sys. Dyn. 50(3), pp. 259-303.



Lê Văn Chương, sinh năm 1985, bảo vệ luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa tại Viện Khoa học và Công nghệ quân sự năm 2023. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: các phương pháp phân tích và tổng hợp các hệ thống điều khiển tự động.



Đặng Thái Sơn, sinh năm 1981, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tử của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2017. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: hệ thống điều khiển nhúng, robotics, ứng dụng các công nghệ mới cho hệ thống điện - điện tử - tự động hóa.



Mai Thế Anh, sinh năm 1987, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển học kỹ thuật và lý thuyết thông tin của Trường Đại học năng lượng Moscow năm 2018. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: robotics, mạng neural, điều khiển mờ.



Dương Đình Tú, sinh năm 1985, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển học kỹ thuật và lý thuyết thông tin của Trường Đại học giao thông Moscow năm 2018. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: thị giác máy tính trong kỹ thuật điều khiển, robotics, mạng neural.



Đinh Văn Nam, sinh năm 1989, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và robot của Đại học Quốc gia Chungbuk, Hàn Quốc năm 2021. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: robotics, SLAM, học máy và hệ thống điều khiển tự động.



Phan Văn Đur, sinh năm 1990, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật cơ khí và ô tô của Đại học Ulsan, Hàn Quốc năm 2023. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: robotics, mạng neural, điều khiển mờ, điều khiển các hệ thủy lực.



Hồ Sỹ Phương, sinh năm 1986, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa của Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2013. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Từ năm 2023 là nghiên cứu sinh tại Viện

Hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam, hướng nghiên cứu chính: mạng neural, điều khiển mờ, robotics.



Tạ Hùng Cường, sinh năm 1986, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa của Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2013. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: điều khiển các

quá trình công nghệ trong công nghiệp, hệ thống truyền thông công nghiệp.



Phan Văn Vỹ, sinh năm 2003, sinh viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa, Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu: robotics, điều khiển mờ, mạng neural.