

## DESIGN OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THREE DEGREES OF FREEDOM ROBOTS

Ngô Tri Nam Cuong<sup>1\*</sup>, Lê Văn Chuong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Systemtec JSC, <sup>2</sup>Vinh University

| ARTICLE INFO   | ABSTRACT   |
|--|--|
| <p><b>Received:</b> 20/01/2022</p> <p><b>Revised:</b> 25/02/2022</p> <p><b>Published:</b> 25/02/2022</p>   | <p>In this paper, a solution of control system design for industrial robots with three degrees of freedom is proposed. The mathematical model of the robot is presented by nonlinear equations using Taylor transformation. The nonlinear equations represent the states of the system with variable parameters, under the influence of unmeasurable external disturbance. The nonlinear function vector, the change of the dynamic parameters and the external disturbance are identified, compensated and adjusted base on adaptive control theory and the RBF neural network. Thus, the control system becomes robust under influence of uncertain components. The control law is built based on the principle of sliding mode control, so the designed system can give characteristics with high stability. The received results have shown advantages of the designed controller in terms of adaptation, interference resistance and performance.</p> |
| <p><b>KEYWORDS</b></p> <p>Automatic control</p> <p>Robot control</p> <p>Adaptive control</p> <p>RBF neural network</p> <p>Sliding mode control</p> |  |

## TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI ROBOT BA BẬC TỰ DO

Ngô Trí Nam Cường<sup>1\*</sup>, Lê Văn Chương<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Công ty Cổ phần Systemtec, <sup>2</sup>Trường Đại học Vinh

| THÔNG TIN BÀI BÁO  | TÓM TẮT   |
|--|---|
| <p><b>Ngày nhận bài:</b> 20/01/2022</p> <p><b>Ngày hoàn thiện:</b> 25/02/2022</p> <p><b>Ngày đăng:</b> 25/02/2022</p>                              | <p>Bài báo trình bày một giải pháp thiết kế bộ điều khiển cho robot công nghiệp ba bậc tự do. Trong đó mô hình toán của robot ba bậc tự do được khai triển thành hệ phương trình trạng thái phi tuyến thông qua phép biến đổi Taylor. Với hệ phương trình trạng thái có tính đến trường hợp tham số thay đổi theo thời gian và chịu nhiễu ngoài tác động không đo được. Vectơ hàm phi tuyến, các tham số động học thay đổi cùng với nhiễu ngoài được nhận dạng, chỉnh định bù trừ trên cơ sở lý thuyết điều khiển thích nghi và mạng nơron RBF. Nhờ đó hệ trở lên bền vững với các thành phần thay đổi bất định. Luật điều khiển được xây dựng dựa trên nguyên lý điều khiển trượt nên hệ có tính bền vững. Bộ điều khiển thu được có khả năng thích nghi, kháng nhiễu và có chất lượng điều khiển cao.</p> |
| <p><b>TỪ KHÓA</b></p> <p>Điều khiển tự động</p> <p>Điều khiển robot</p> <p>Điều khiển thích nghi</p> <p>Mạng nơron RBF</p> <p>Điều khiển trượt</p> |   |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5481>

\* Corresponding author. Email: [ncuong792000@gmail.com](mailto:ncuong792000@gmail.com)

## 1. Giới thiệu

Ngày nay, robot ba bậc tự do (3-DOF) được sử dụng phổ biến trong công nghiệp, do nhu cầu nâng cao chất lượng và năng suất trong sản xuất hàng hóa ngày càng cao, do đó, yêu cầu cần phải cải thiện chất lượng của robot 3-DOF luôn là yêu cầu bức thiết của thực tế. Để nâng cao độ chính xác của robot 3-DOF luật điều khiển đóng vai trò quan trọng. Đã có nhiều nghiên cứu các phương pháp điều khiển khác nhau để tổng hợp bộ điều khiển cho robot 3-DOF. Phương pháp điều khiển thích nghi được quan tâm nghiên cứu [1]-[4]. Trong [1], luật điều khiển thích nghi được xây dựng theo mô hình chuẩn; tồn tại của phương pháp này là khi quỹ đạo làm việc, tải trọng thay đổi phải xác định lại tham số mô hình tham chiếu. Luật điều khiển ở các tài liệu [2]-[4] được thiết lập từ biến sai số trạng thái của hệ thống và trạng thái mong muốn; do vậy quá trình cập nhật luật thích nghi diễn ra khi thay đổi quỹ đạo làm việc, điều này gây ra nhiều bất lợi. Phương pháp điều khiển bền vững trên cơ sở điều khiển trượt [5], [6], điều khiển bền vững chỉ phát huy hiệu quả khi biết được giới hạn thành phần bất định, trong nhiều trường hợp không xác định được giới hạn này.

Dưới đây, bài báo trình bày giải pháp thiết kế bộ điều khiển thích nghi cho tay máy ba bậc tự do có tính đến mô hình tham số thay đổi và có nhiễu ngoài.

## 2. Mô hình toán học robot công nghiệp ba bậc tự do

Phương trình động học robot công nghiệp 3-DOF [7]:

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

Trong đó:  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là vector biến khớp;  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là vector mômen đầu vào.  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là ma trận khối lượng suy rộng;  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là ma trận các thành phần li tâm và lực Coriolis;  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là vector thành phần lực trọng trường.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} b_3 s_2 s_3 + b_6 c_2^2 + b_7 c_3^2 + b_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5b_3(c_2 c_3 + s_2 s_3) + b_{13} & 0.5b_3(c_2 c_3 + s_2 s_3) + b_{14} \\ 0 & 0.5b_3(c_2 c_3 + s_2 s_3) + b_{17} & b_{16} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \dot{q}_1 s_2 c_2 + b_3 \dot{q}_1 s_2 c_3 & b_3 \dot{q}_1 s_2 c_3 + b_4 \dot{q}_1 s_3 c_3 \\ 2b_{11} \dot{q}_1 s_3 c_2 + 2b_{12} \dot{q}_1 s_2 c_3 - 0.5b_3 \dot{q}_1 (s_2 c_3 + c_2 s_3) & 0.5b_3 \dot{q}_2 (c_2 s_3 - s_2 c_3) + b_{10} & 0.5b_3 \dot{q}_3 (s_2 c_3 - c_2 s_3) \\ 2b_{12} \dot{q}_1 s_3 c_3 - 0.5b_3 \dot{q}_1 s_2 c_3 & 0.5b_3 \dot{q}_2 (c_2 s_3 - s_2 c_3) - b_{15} & b_{15} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_8 s_2 + b_9 s_3 \\ b_9 s_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

với:  $s_i = \sin(q_i)$ ;  $c_i = \cos(q_i)$ . Tham số của (2), (3), (4) được xác định theo Bảng 1, trong đó:  $m_i$  và  $a_i$  là khối lượng và chiều dài của khâu thứ  $i$ ;  $I_{xx,i}$ ,  $I_{yy,i}$ ,  $I_{zz,i}$  là moment quán tính;  $f_{v,i}$  là hệ số ma sát nhớt của khâu thứ  $i$  với ( $i=1,2,3$ ).

**Bảng 1.** Các tham số của các ma trận (2),(3),(4) [7]

|                                 |  |   |
|---------------------------------|--|---|
| $b_1 = f_{v,1}$                 | $b_2 = 2(m_3 a_2^2 - I_{xx,2} + I_{yy,2})$         | $b_3 = M_{y,3} a_2$                     |
| $b_4 = 2(I_{xx,3} - I_{yy,3})$  | $b_5 = m_3 a_2^2 + I_{xx,3} + I_{yy,2} + I_{zz,1}$ | $b_6 = I_{xx,2} - I_{yy,2} - m_3 a_2^2$ |
| $b_7 = I_{yy,3} - I_{xx,3}$     | $b_8 = -(M_{x,2} + a_2 m_3)g$                      | $b_9 = -M_{x,2}g$                       |
| $b_{10} = f_{v,2}$              | $b_{11} = 0.5(I_{xx,2} - I_{yy,2} - m_3 a_2^2)$    | $b_{12} = 0.5(I_{yy,3} - I_{xx,3})$     |
| $b_{13} = m_3 a_2^2 + I_{zz,2}$ | $b_{14} = I_{zz,2}$                                | $b_{15} = f_{v,3}$                      |
| $b_{16} = I_{zz,3} + I_{m,3}$   | $b_{17} = -I_{m,3}$                                |   |

Để thuận lợi cho quá trình thiết kế sau này, với  $\mathbf{M}$  là ma trận khả nghịch [7], chúng tôi viết lại phương trình (1) dưới dạng:

$$\ddot{\mathbf{q}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}, \quad (5)$$

Đặt  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$ , trong đó:  $x_1 = q_1$ ,  $x_2 = \dot{x}_1$ ,  $x_3 = q_2$ ,  $x_4 = \dot{x}_3$ ,  $x_5 = q_3$ ,  $x_6 = \dot{x}_5$ ;  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ . Phương trình (5) được viết lại thành:

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (6)$$

Tiếp tục khai triển Taylor (6) tại điểm cân bằng  $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ta được phương trình:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Trong đó  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  là các ma trận Jacobian;  $\boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x})$  là thành phần bậc cao của phép khai triển Taylor.

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{[\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0]} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \psi_2}{\partial x_3} & \frac{\partial \psi_2}{\partial x_4} & \frac{\partial \psi_2}{\partial x_5} & \frac{\partial \psi_2}{\partial x_6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \psi_4}{\partial x_1} & \frac{\partial \psi_4}{\partial x_2} & \frac{\partial \psi_4}{\partial x_3} & \frac{\partial \psi_4}{\partial x_4} & \frac{\partial \psi_4}{\partial x_5} & \frac{\partial \psi_4}{\partial x_6} \\ \frac{\partial \psi_6}{\partial x_1} & \frac{\partial \psi_6}{\partial x_2} & \frac{\partial \psi_6}{\partial x_3} & \frac{\partial \psi_6}{\partial x_4} & \frac{\partial \psi_6}{\partial x_5} & \frac{\partial \psi_6}{\partial x_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{[\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0]} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial u_1} & \frac{\partial \psi_2}{\partial u_2} & \frac{\partial \psi_2}{\partial u_3} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \psi_4}{\partial u_1} & \frac{\partial \psi_4}{\partial u_2} & \frac{\partial \psi_4}{\partial u_3} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \psi_6}{\partial u_1} & \frac{\partial \psi_6}{\partial u_2} & \frac{\partial \psi_6}{\partial u_3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Trong thực tế khi hoạt động robot công nghiệp 3-DOF chịu tác động của các yếu tố bất định như: sai lệch do cơ cấu chấp hành, nhiễu tải và nhiễu yếu tố khác, kéo theo các tham số động học của robot thay đổi và nhiều trường hợp có nhiễu ngoài tác động không đo được. Do vậy, phương trình (7) được viết lại thành:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}]\mathbf{x} + [\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}]\mathbf{u} + \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}) + \mathbf{d}(t), \quad (10)$$

Trong đó,  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  là các ma trận không đổi,  $\Delta\mathbf{A}$  là ma trận có các phần tử  $\Delta a_{ij}$  thay đổi,  $\Delta a_{ij \min} \leq \Delta a_{ij} \leq \Delta a_{ij \max}$ , ( $i, j = \overline{1,6}$ );  $\Delta\mathbf{B}$  là ma trận có các phần tử  $\Delta b_{ij}$  thay đổi,

$$\Delta b_{ij \min} \leq \Delta b_{ij} \leq \Delta b_{ij \max}, \quad (i = \overline{1,6}; j = \overline{1,3}); \mathbf{d}(t) \text{ là vector nhiễu ngoài và bị chặn.}$$

Tiếp đến, bài báo đề xuất phương pháp tổng hợp bộ điều khiển thích nghi cho robot công nghiệp 3-DOF có mô hình (10).

### 3. Tổng hợp bộ điều khiển robot công nghiệp ba bậc tự do

Phương trình (10) được viết lại dưới dạng:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + [\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}]\mathbf{u} + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{d}(t), \quad (11)$$

trong đó:  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \Delta\mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x})$ .

Mô hình nhận dạng các thành phần thay đổi có trong phương trình (11):

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}\mathbf{x}_m + [\mathbf{B} + \Delta\hat{\mathbf{B}}_m]\mathbf{u} + \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \hat{\mathbf{d}}(t), \quad (12)$$

Trong đó:  $\mathbf{x}_m$  - vector trạng thái của mô hình;  $\Delta\hat{\mathbf{B}}_m$  - ma trận đánh giá của  $\Delta\mathbf{B}$ ;  $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$  - vector đánh giá của  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ;  $\hat{\mathbf{d}}(t)$  - vector đánh giá của  $\mathbf{d}(t)$ .

Biến đổi phương trình (11) và phương trình (12) ta nhận được phương trình sai số:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{Ae} + [\Delta\tilde{\mathbf{B}}]\mathbf{u} + \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{d}}(t), \quad (13)$$

Trong đó:  $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_m$  (14)  $\Delta\tilde{\mathbf{B}} = \Delta\mathbf{B} - \Delta\mathbf{B}_m$  (15)

$$\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) \quad (16) \quad \tilde{\mathbf{d}}(t) = \mathbf{d}(t) - \hat{\mathbf{d}}(t) \quad (17)$$

Luật nhận dạng các thành phần thay đổi  $\Delta\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{d}(t)$  ở tài liệu [8].

Luật nhận dạng ma trận  $\Delta\mathbf{B}$  thông qua ma trận đánh giá  $\Delta\hat{\mathbf{B}}$  với các phần tử [8]:

$$\Delta b_{ij} \simeq \Delta \hat{b}_{ij} = \int u_j \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{E} dt + \Delta b_{ij}^0, \quad i = \overline{1,6}; \quad j = \overline{1,3}. \quad (18)$$

Luật nhận dạng vector hàm phi tuyến  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  [8]:

$$f_i(\mathbf{x}) \simeq \hat{f}_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^L \hat{w}_{ij} \phi_j(\mathbf{x}); \quad \hat{w}_{ij} = \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{E} \phi_j(\mathbf{x}). \quad (19)$$

Trong đó:  $\hat{f}_i(\mathbf{x})$  là các phần tử của vector  $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$ ;  $\hat{w}_{ij}$  là trọng số hiệu chỉnh;  $\bar{\mathbf{P}}_i$  là hàng thứ  $i$  của ma trận đối xứng xác định dương  $\mathbf{P}^{6 \times 6}$ ;  $i = \overline{1,6}$ ;  $j = \overline{1,L}$ .

Luật nhận dạng vector nhiễu ngoài  $\mathbf{d}(t)$  không đo được có các phần tử [8]:

$$d_i(t) \simeq \hat{d}_i(t) = \int \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{E} dt, \quad (20)$$

Trong đó:  $\hat{d}_i(t)$  là các phần tử của vector đánh giá nhiễu ngoài  $\hat{\mathbf{d}}(t)$ ,  $i = \overline{1,6}$ .

Các luật nhận dạng (18), (19), (20) được sử dụng để tổng hợp luật chỉnh định thích nghi được trình bày tiếp theo.

Với đối tượng có phương trình (11) luật điều khiển  $\mathbf{u}$  có dạng [8]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{smc} + \mathbf{u}_b, \quad (21)$$

trong đó  $\mathbf{u}_{smc}$  là luật điều khiển trượt,  $\mathbf{u}_b$  là luật điều khiển thích nghi.

Luật chỉnh định thích nghi [8]:

$$\mathbf{u}_b = -\mathbf{H} \left[ [\Delta \hat{b}_{ij}] \mathbf{u} + [\hat{f}_i(\mathbf{x})]^T + [\hat{d}_i(t)]^T \right], \quad i = \overline{1,6}; \quad j = \overline{1,3}. \quad (22)$$

trong đó  $\mathbf{H}$  là ma trận hệ số khuếch đại,  $\mathbf{H} = \mathbf{B}^+$ ,  $\mathbf{B}^+$  là ma trận giả nghịch đảo của  $\mathbf{B}$  [9].

Với vector tín hiệu  $\mathbf{u}_b$  (22) được đưa tới đầu vào của đối tượng, khi đó các thành phần bất định được bù trừ [8] và (11) trở thành:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{smc}. \quad (23)$$

Vector sai lệch giữa vector trạng thái của đối tượng và vector trạng thái mong muốn  $\mathbf{x}_d$ :

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d. \quad (24)$$

Luật điều khiển trượt  $\mathbf{u}_{smc}$  [8]:

$$\mathbf{u}_{smc} = \begin{cases} -[\mathbf{CB}]^{-1} [\delta \operatorname{sgn}(s_1), \delta \operatorname{sgn}(s_2), \delta \operatorname{sgn}(s_3)]^T & \text{khi } \mathbf{S} \neq 0 \\ -[\mathbf{CB}]^{-1} [\mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}_d - \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_d] & \text{khi } \mathbf{S} = 0 \end{cases}, \quad (25)$$

với siêu mặt trượt được chọn  $\mathbf{S} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} = [s_1, s_2, s_3]^T$ ;  $\mathbf{C}$  là ma trận tham số siêu mặt trượt và chọn  $\mathbf{C}$  sao cho  $\det[\mathbf{CB}] \neq 0$ ;  $\delta$  là hệ số dương nhỏ.

Như vậy, với các luật được trình bày ở [8] được áp dụng để tổng hợp bộ điều khiển  $\mathbf{u}$  (21) cho

robot 3-DOF có phương trình (11) với  $\mathbf{u}_b$  (22) và  $\mathbf{u}_{smc}$  (25).

**4. Mô phỏng và kiểm chứng kết quả**

Tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink với bộ điều khiển (21), các tham số mô phỏng được lấy từ tài liệu [7] được trình bày trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Các tham số của robot 3-DOF [7]

|                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $b_1 = 0.4701$    | $b_2 = 0.1094$    | $b_3 = 0.0151$    | $b_4 = 0.0591$    | $b_5 = 0.0626$    | $b_6 = 0.0229$    |
| $b_7 = -0.0054$   | $b_8 = -0.0051$   | $b_9 = 0.0097$    | $b_{10} = 0.7741$ | $b_{11} = 0.2345$ | $b_{12} = 0.0731$ |
| $b_{13} = 0.1991$ | $b_{14} = 0.0603$ | $b_{15} = 0.7218$ | $b_{16} = 0.1033$ | $b_{17} = 0.0906$ |                   |

Khai triển Taylor (6) tại điểm cân bằng  $\mathbf{x}_0 = [0, 0, 0, 0, -\pi/2, 0]^T$ ,  $\mathbf{u}_0 = [0, -0.0097, -0.0097]^T$ , các ma trận (8), (9) thu được là:

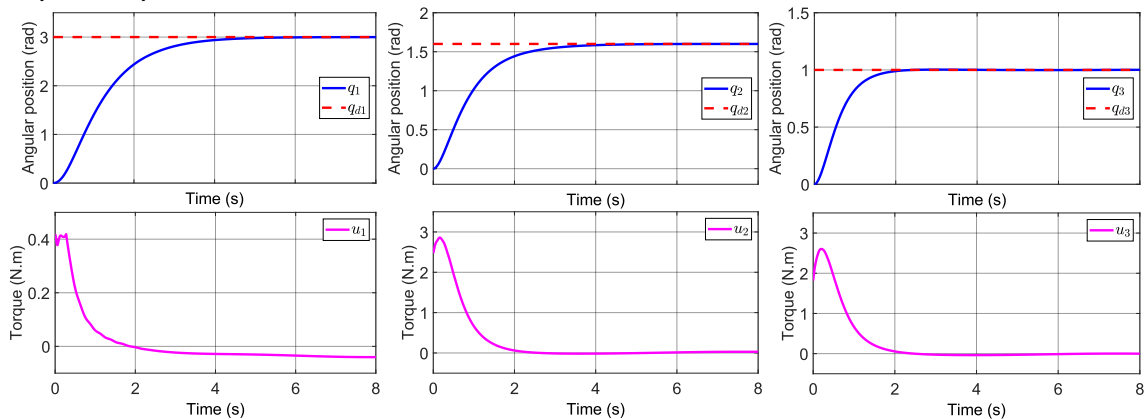
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5.50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0350 & -8.22 & -0.0000221 & 2.90 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.0308 & 14.3 & -0.0000563 & -9.60 \end{bmatrix} \quad (26) \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 11.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.87 & -4.02 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6.04 & 13.3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Vecto hàm phi tuyến và nhiễu ngoài (11) giả sử có dạng:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.3 \sin(x_1) + \sin(x_3 + x_5) - 0.05 \sin(x_3) + 0.6x_4 \cos(x_5) + 0.5x_6 \sin(x_5) \\ 0 \\ -0.2 \cos(x_1) + 0.2x_2 \sin(x_3) - x_4x_6 \cos(x_3) \cos(x_5) \\ 0 \\ -0.5 \sin(x_1) + \sin(x_3 + x_5) + 0.3 \sin(x_3) + 0.5x_6 \sin(x_5) + 0.35x_4 \cos(x_5) \end{bmatrix}; \quad (28)$$

$$\mathbf{d}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05 \sin(t) \\ 0 \\ 0.12 \sin(0.3t) \\ 0 \\ 0.12 \sin(0.5t) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Kết quả mô phỏng trường hợp  $\Delta\mathbf{A} = 0$ ,  $\Delta\mathbf{B} = 0$ , tín hiệu đặt:  $\mathbf{q} = [q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}]^T = [3, 1.6, 1]^T$ , được thể hiện trên Hình 1.



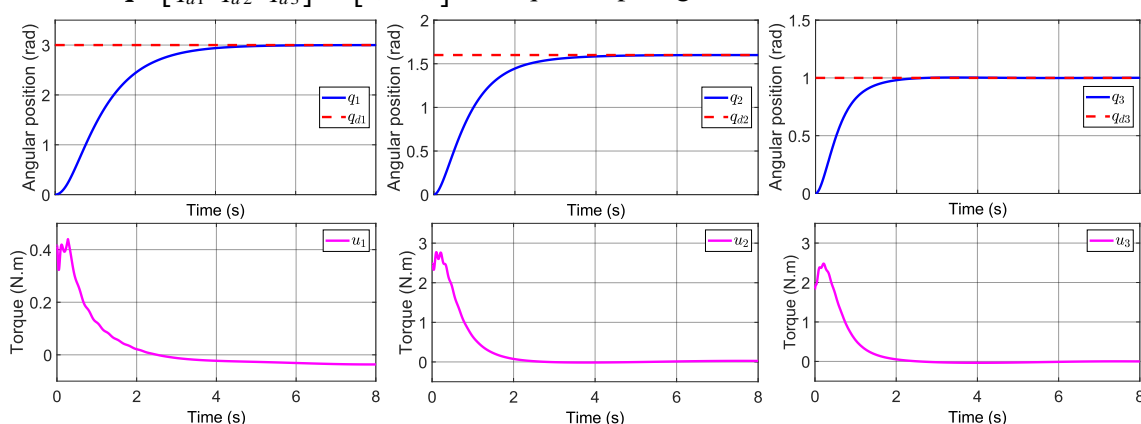
**Hình 1.** Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển (21) cho trường hợp  $\Delta\mathbf{A} = 0, \Delta\mathbf{B} = 0$

Tiếp tục mô phỏng trường hợp các ma trận tham số thay đổi 10% :

$$\Delta \mathbf{A} = 10\% \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.55 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0035 & -0.822 & -2.21 \cdot 10^{-6} & 0.29 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.00308 & 1.43 & -5.63 \cdot 10^{-6} & -0.96 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\Delta \mathbf{B} = 10\% \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.687 & -0.402 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.604 & 1.33 \end{bmatrix} \quad (31)$$

các ma trận  $\mathbf{A}$  (26),  $\mathbf{B}$  (27) vector hàm phi tuyến (28) và vector nhiễu (29) “chú ý (11)”, tín hiệu đặt:  $\mathbf{q} = [q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}]^T = [3, 1.6, 1]^T$ , kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 2.



**Hình 2.** Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển (21) cho trường hợp  $\Delta \mathbf{A}$  (30),  $\Delta \mathbf{B}$  (31).

Hình 1 cho ta thấy đáp ứng các biến khớp của robot ba bậc tự do  $[q_1, q_2, q_3]^T$  bám chặt tín hiệu đặt mong muốn  $[q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}]^T$ . Hình 2 thể hiện kết quả bám của các biến khớp robot  $[q_1, q_2, q_3]^T$  vẫn bám chặt tín hiệu đặt mong muốn  $[q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}]^T$  ngay cả trường hợp các ma trận tham số của robot thay đổi  $\Delta \mathbf{A} = 10\% \mathbf{A}$ ,  $\Delta \mathbf{B} = 10\% \mathbf{B}$ . Kết quả mô phỏng này minh chứng tính hiệu quả của luật điều khiển robot công nghiệp ba bậc tự do của bài báo.

## 5. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp được bộ điều khiển cho robot công nghiệp ba bậc tự do trên cơ sở thuật toán được nghiên cứu trước đó. Đã biến đổi mô hình động lực học của robot thành hệ phương trình trạng thái thông qua khai triển Taylor tại điểm cân bằng. Với mô hình trạng thái phi tuyến của robot, các ma trận động học có lúc có thể thay đổi, cùng với hàm phi tuyến bất định và nhiễu ngoài được nhận dạng và chỉnh định bằng luật điều khiển thích nghi. Trong đó, quá trình cập nhật luật thích nghi có ưu điểm nổi trội là chỉ diễn ra khi các thành phần tham số, hàm phi tuyến và nhiễu ngoài thay đổi mà không phụ thuộc bất kỳ một yếu tố nào khác. Từ luật thích nghi bù trừ các thành phần bất định, do vậy luật điều khiển trượt đã giảm được hiệu ứng rung đến mức tối thiểu. 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/ REFERENCES

- [1] H. V. A. A. Rojas-Moreno, "Real-Time Model Reference Adaptive Control of a 3DOF Robot Arm," in *2019 IEEE XXVI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2019.
- [2] S. J. a. A. Y. a. M. H. Ramezani, "Tracking of a 3.D.O.F robot using adaptive robust control under uncertainties," in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011, pp. 1167-1172.
- [3] A. F. a. S. E. A. a. E. W. M. Amer, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Using Supervisory Fuzzy Control for 3 DOF Planar Robot Manipulators," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 8, pp. 4943-4953, 2011.
- [4] W. Wróblewski, "Neural implementation of the classical PD algorithm for the 3DOF manipulator," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, no. 17, pp. 259-263, 2003.
- [5] C. M. S. a. H. K. Fallaha, "Sliding mode control with exponential reaching law applied on a 3 DOF modular robot arm," in *2007 European Control Conference (ECC)*, 2007, pp. 4925-4931.
- [6] R. M. Y. S. H. a. R. P. Asl, "Robust control by adaptive non-singular terminal sliding mode," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 59, pp. 205-217, 2017.
- [7] C. H. S. M. A. H. S. & W. H. Hoffmann, "Benchmark problem-nonlinear control of a 3-DOF robotic manipulator," *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2013.
- [8] T. N. C. Ngo and V. C. Le, "Synthesis of adaptive control system for a class of nonlinear with variable parameters in the wide range," *Journal of Military Science and Technology*, no. 73, pp. 40-47, 2021.
- [9] J. M. Ortega, *Matrix Theory*. Plenum Press, 1987.