

DISTURBANCE ESTIMATOR-BASED CONTROL FOR MANIPULATORS WITH MODEL UNCERTAINTY AND DISTURBANCE

Nguyen Hoai Nam^{1*}, Ha Luong Thanh Duc¹, Le Van Danh¹, Ngo Duc Minh¹,
 Nguyen Minh Anh¹, Nguyen Thanh Chien¹, Pham Ba Quang²

¹School of Electrical and Electronic Engineering - Hanoi University of Science and Technology

²Chu Van An High School, Hanoi

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	12/6/2024	Robotic manipulators have been widely applied in practice. They operate in different environments and can take time-varying loads. Thus, their mathematical models can be uncertain and will be affected by external disturbances. In this paper, a disturbance estimator-based feedback linearization controller is proposed for a robotic manipulator with model uncertainty and unknown disturbance. First, a mathematical model with model uncertainty and unknown disturbance is obtained for the robotic manipulators. Then, based on this model, the disturbance estimator and proposed controller are designed. Next, stability analysis is rigorously performed, and the tracking error is proved to be bounded. The proposed controller improves the control performance of the feedback linearization controller when there exists model uncertainty and disturbance. Numerical simulations for a two-link planar robot are carried out to verify the proposed regulator and to compare with the existing one. Results show that the control quality is better than that of the feedback linearization controller.
Revised:	10/7/2024	
Published:	11/7/2024	
KEYWORDS		
Disturbance estimator		
Manipulator		
Feedback linearization		
Model uncertainty		
Nonlinear system		

ĐIỀU KHIỂN DỰA TRÊN BỘ ƯỚC LƯỢNG NHIỀU CHO CÁN TAY MÁY CÓ MÔ HÌNH BẤT ĐỊNH VÀ NHIỀU

Nguyễn Hoài Nam^{1*}, Hà Lương Thành Đức¹, Lê Văn Danh¹, Ngô Đức Minh¹,
 Nguyễn Minh Anh¹, Nguyễn Thành Chiên¹, Phạm Bá Quang²

¹Trường Điện – Điện tử - Đại học Bách khoa Hà Nội, ²Trường PTTH Chu Văn An, Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	12/6/2024	Cánh tay máy đã được sử dụng rất nhiều trong thực tế. Chúng hoạt động trong các môi trường khác nhau và có thể mang các tải thay đổi theo thời gian. Do đó, mô hình toán học của chúng có thể bất định và sẽ bị ảnh hưởng bởi các nhiễu tác động từ bên ngoài. Trong bài báo này, một bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi dựa trên bộ ước lượng nhiễu đã được đề xuất cho cánh tay máy có mô hình bất định và nhiễu chưa biết. Đầu tiên, một mô hình toán có bất định mô hình và nhiễu ngoài chưa biết được thành lập. Sau đó, dựa trên mô hình này bộ ước lượng nhiễu và bộ điều khiển đề xuất sẽ được thiết kế. Tiếp theo, phân tích tính ổn định sẽ được thực hiện chặt chẽ, và sai số điều khiển bám được chứng minh bị chặn. Bộ điều khiển đề xuất đã cải thiện được chất lượng điều khiển của bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi khi có mô hình bất định và nhiễu chưa biết. Mô phỏng số cho cánh tay máy phẳng đã được thực hiện để kiểm chứng phương pháp điều khiển đề xuất và so sánh với phương pháp đã có. Kết quả cho thấy chất lượng điều khiển tốt hơn bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi.
Ngày hoàn thiện:	10/7/2024	
Ngày đăng:	11/7/2024	
TỪ KHÓA		
Bộ ước lượng nhiễu		
Cánh tay máy		
Tuyến tính hóa phản hồi		
Bất định mô hình		
Hệ phi tuyến		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10595>

* Corresponding author. Email: nam.nguyenhoai@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Rô bốt công nghiệp đã được nghiên cứu và ứng dụng rất nhiều trong công nghiệp và dân dụng [1]. Chúng có thể thay thế con người thực hiện những công việc nặng nhọc, nguy hiểm và làm việc liên tục. Cánh tay máy là một trong những rô bốt công nghiệp được sử dụng rất nhiều trong các dây chuyền sản xuất và lắp ráp. Đây là một đối tượng nhiều vào và nhiều ra, phi tuyến và có tải thay đổi theo thời gian [2]. Điều này dẫn tới mô hình toán có thể bất định và đối tượng bị chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài chưa biết.

Có rất nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu và áp dụng cho cánh tay máy, như phương pháp tuyến tính hóa phản hồi [3], phương pháp điều khiển tỉ lệ vi phân có bù trọng lực [4]. Các phương pháp này làm việc hiệu quả khi mô hình toán của cánh tay máy là đã biết và không chịu ảnh hưởng của nhiễu. Tuy nhiên chất lượng điều khiển sẽ bị ảnh hưởng lớn nếu như mô hình không biến và có tác động từ bên ngoài.

Để giải quyết các vấn đề này, có nhiều phương pháp đã được nghiên cứu như điều khiển trượt [5], điều khiển thích nghi [6], điều khiển phi tuyến [7], điều khiển học lặp [8]. Ngoài ra còn có thể sử dụng các bộ quan sát nhiễu phi tuyến [9], sau đó sẽ bù nhiễu tác động bằng thành phần nhiễu ước lượng. Gần đây, một bộ ước lượng nhiễu dựa trên nguyên lý tối ưu dịch trực thời gian đã được đề xuất [10]. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu và đề xuất một bộ điều khiển mới nhằm nâng cao chất lượng điều khiển của bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi [3] bằng cách kết hợp với bộ quan sát [10] để bù ảnh hưởng của bất định mô hình cũng như nhiễu ngoài tác động.

Nội dung còn lại của bài báo gồm: mục 2 sẽ trình bày về phương pháp thiết kế bao gồm mô hình toán của cánh tay máy có mô hình bất định và nhiễu ngoài tác động, phương pháp thiết kế bộ điều khiển, và chứng minh tính ổn định của hệ kín; mục 3 sẽ trình bày kết quả và bàn luận thông qua mô phỏng và so sánh với phương pháp tuyến tính hóa phản hồi; và phần cuối cùng là mục 4 sẽ đưa ra kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Phương pháp thiết kế

2.1. Xây dựng mô hình toán

Mô hình toán của cánh tay máy có dạng tổng quát như sau [1]:

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

trong đó $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận quán tính, $C((q, \dot{q}))\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ là lực hướng tâm và Coriolis, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ lực trọng trường, $\tau \in \mathbb{R}^n$ là mô men tác động đầu vào và τ_d là véc tơ nhiễu tác động từ bên ngoài vào. $q, \dot{q}, \ddot{q}$ lần lượt là vị trí, tốc độ và gia tốc của các khớp.

Cho giá trị đặt $q_d(t) \in \mathbb{R}^n$, tìm tín hiệu điều khiển τ sao cho:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) \rightarrow q_d(t), \quad (2)$$

với điều kiện M, C và G là bất định.

Để giải quyết tính bất định của mô hình, giả thiết ta có thể biểu diễn chúng như sau:

$$\begin{cases} M = M_0 + \Delta M \\ C = C_0 + \Delta C \\ G = G_0 + \Delta G \end{cases}$$

Trong đó, M_0, C_0 và G_0 là các thành phần đã biết từ đối tượng, còn $\Delta M, \Delta C$ và ΔG là những thành phần bất định chưa biết. Phương trình (1) có thể được viết lại dưới dạng sau:

$$M_0(q)\ddot{q} + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) = \tau + \tau_c, \quad (3)$$

Trong đó $\tau_c = -\Delta M\ddot{q} - \Delta C\dot{q} - \Delta G + \tau_d$ được gọi là nhiễu tổng, M_0 có tính chất $M_0 \geq I\mu$ với I là ma trận đơn vị và $\mu > 0$. Mô hình (3) sẽ được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển ở phần tiếp theo. Mô hình này thể hiện được tính bất định của mô hình cũng như nhiễu ngoài tác động vào rô bốt.

2.2. Điều khiển tuyến tính hóa dựa trên bộ ước lượng nhiễu

Bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi có dạng như sau [3]:

$$\tau = M_0(\ddot{q}_d + K_P\dot{\tilde{q}} + K_V\tilde{q}) + G_0(q) + C_0(q, \dot{q})\dot{q}, \quad (4)$$

Trong đó $\tilde{q} = q_d - q$, K_P và K_V là các ma trận đối xứng xác định dương. Bộ điều khiển này sẽ làm cho sai lệch bám $\tilde{q}$ tiến đến không nếu như nhiễu tổng $\tau_c = 0$. Khi nhiễu tổng khác không, chất lượng điều khiển của hệ thống không còn được đảm bảo nữa, sai lệch bám sẽ khác không và thậm chí không ổn định nữa. Để khắc phục nhược điểm này, một bộ ước lượng nhiễu sẽ được thiết kế như sau [10].

Đặt $\underline{x} = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$, $A(\underline{x}) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M_0^{-1}(\underline{x}_1)[C_0(\underline{x}_1, \underline{x}_2)\underline{x}_2 + G_0(\underline{x}_1)] \end{bmatrix}$ và $B(\underline{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_0^{-1}(\underline{x}_1) \end{bmatrix}$. Ta có thể viết lại (3) dưới dạng sau:

$$\dot{\underline{x}} = A(\underline{x}, t)\underline{x} + B(\underline{x}, t)(\underline{u} + \underline{d}), \quad (5)$$

với $\underline{d} = \tau_c$ và $\underline{u} = \tau$.

Theo công thức Euler ta có xấp xỉ:

$$\dot{\underline{x}}(t) \approx \frac{\underline{x}_k - \underline{x}_{k-1}}{\delta}, \quad (6)$$

với δ là chu kỳ lấy mẫu được chọn đủ nhỏ để sai số xấp xỉ đủ bé. Thay (5) vào (4) ta có:

$$\begin{aligned} \underline{x}_k &\approx [I + \delta A(\underline{x}_{k-1}, t_k)]\underline{x}_{k-1} + \delta B(\underline{x}_{k-1}, t_k)[\underline{u}_k + \underline{d}_k - \underline{d}_{k-1}] \\ &\approx A_k^x \underline{x}_{k-1} + B_k^x [\underline{u}_k + \underline{d}_k - \underline{d}_{k-1}] \\ &= A_k^x \underline{x}_{k-1} + B_k^x [\underline{u}_k + \underline{d}_k - \underline{d}_{k-1}] + \zeta_k, \end{aligned} \quad (7)$$

với $A_k^x = I + \delta A(\underline{x}_{k-1}, t_k)$, $B_k^x = \delta B(\underline{x}_{k-1}, t_k)$, $\underline{d}_k = d(t_k)$. Để xác định được $\underline{d}_k$ từ phương trình (7) thì ta sẽ so sánh với mô hình tham chiếu:

$$\underline{z}_k = A_k^z \underline{z}_{k-1} + B_k^z [\underline{u}_k - \underline{d}_{k-1}], \quad (8)$$

với $A_k^z = I + \delta A(\underline{z}_{k-1}, t_k)$. Từ (7) và (8) thu được:

$$\underline{\zeta}_k = \underline{x}_k - \underline{z}_k - A_k^x \underline{x}_{k-1} + A_k^z \underline{z}_{k-1} - B_k^x \underline{d}_k \quad (9)$$

Định nghĩa hàm mục tiêu:

$$J_k(\underline{d}_k) = \underline{\zeta}_k^T \underline{\zeta}_k \rightarrow \min \quad (10)$$

Đặt $\underline{h}_k = \underline{x}_k - \underline{z}_k - A_k^x \underline{x}_{k-1} + A_k^z \underline{z}_{k-1}$. Ta có:

$$\begin{aligned} J_k(\underline{d}_k) &= (\underline{h}_k - B_k^x \underline{d}_k)^T (\underline{h}_k - B_k^x \underline{d}_k) \\ &= \underline{d}_k^T (B_k^x)^T B_k^x \underline{d}_k - 2 \underline{h}_k^T B_k^x \underline{d}_k + \underline{h}_k^T \underline{h}_k \end{aligned} \quad (11)$$

Từ đây ta có nhiễu ước lượng là:

$$\begin{aligned} \underline{d}_k &= [(B_k^x)^T B_k^x]^{-1} (B_k^x)^T \underline{h}_k \\ &= [(B_k^x)^T B_k^x]^{-1} (B_k^x)^T (\underline{x}_k - \underline{z}_k - A_k^x \underline{x}_{k-1} + A_k^z \underline{z}_{k-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

Như vậy bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi dựa trên bộ quan sát nhiễu được đề xuất như sau:

$$\tau = M_0(\ddot{q}_d + K_P \tilde{q} + K_V \dot{\tilde{q}}) + G_0(q) + C_0(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{\tau}_c \quad (13)$$

Giả thiết 1: Sai số ước lượng là bị chặn: $\tau_c - \hat{\tau}_c \leq \Delta$.

Giả thiết 2: Ma trận $H = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ -K_P & -K_V \end{bmatrix}$ là Hurwitz.

Định lý 1: Xét hệ thống (3) với luật điều khiển (13). Sai lệch điều khiển $\tilde{q}$ sẽ bị chặn nếu giả thiết 1 và giả thiết 2 được thỏa mãn.

Chứng minh: Thay bộ điều khiển (13) vào (3) ta có:

$$\ddot{q}_d - \ddot{q} + K_P \tilde{q} + K_V \dot{\tilde{q}} = M_0^{-1}(\tau_c - \hat{\tau}_c) \quad (14)$$

Đặt $\underline{e} = \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix}$, ta có:

$$\dot{\underline{e}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ -K_P & -K_V \end{bmatrix} \underline{e} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ I \end{bmatrix} M_0^{-1}(\tau_c - \hat{\tau}_c). \quad (15)$$

Khi không có bất định mô hình và nhiễu $\tau_c = \mathbf{0}$ và không sử dụng bộ ước lượng nhiễu, (15) trở thành $\dot{\underline{e}} = H \underline{e}$. Theo giả thiết 2, hệ thống này ổn định vì ma trận H là Hurwitz. Do đó tồn tại hàm Lyapunov $V = \underline{e}^T P \underline{e}$ với $P = P^T > 0$ là ma trận đối xứng xác định dương và $\dot{V} =$

$\underline{e}^T (H^T P + PH) \underline{e} < 0$. Do đó $H^T P + PH = -Q$ là ma trận đối xứng xác định âm (Q là ma trận đối xứng xác định dương).

Khi có bất định mô hình và nhiễu,

$$\dot{V} = -\underline{e}^T Q \underline{e} + 2\underline{e}^T P E v \leq -\gamma_m |\underline{e}|^2 + 2\frac{\Delta}{\mu} |PE| |\underline{e}|,$$

trong đó γ_m là giá trị riêng nhỏ nhất của ma trận Q , $v = M_0^{-1}(\tau_c - \hat{\tau}_c)$, $|\cdot|$ là chuẩn của véc tơ $\cdot$, và $E = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$. Như vậy $\underline{e} \notin S = \left\{ \underline{e} \mid |\underline{e}| \leq 2|PE| \frac{\Delta}{\mu\gamma_m} \right\}$ thì $\dot{V} < 0$, dẫn tới $\underline{e}$ tiến về tập S . Như vậy sai số điều khiển bám bị chặn bởi tập hút S .

3. Kết quả và bàn luận

Trong phần này sẽ sử dụng cánh tay máy phẳng hai bậc tự do để kiểm chứng bộ điều khiển đề xuất (12) và so sánh với bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi (4). Mô hình toán (3) có dạng:

$$M_0(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2) + 2m_2l_1l_2 \cos(q_2) + J_1 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2) & m_2l_2^2 + J_2 \end{bmatrix}$$

$$C_0(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_1 & -2m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_1 \\ 0 & m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

$$G_0(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1 \cos(q_2) + m_2gl_2 \cos(q_1 + q_2) \\ m_2gl_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

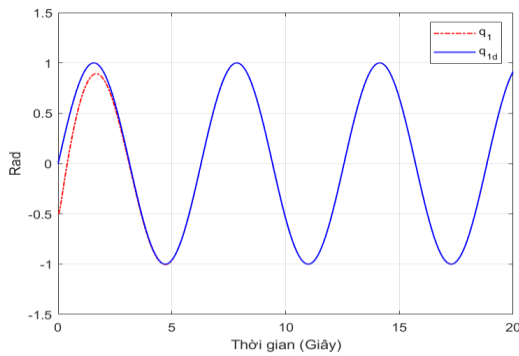
với $l_1 = 1m$, $l_2 = 0.5m$, $m_1 = 1kg$, $m_2 = 0.5kg$, $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$, $J_1 = 0.5kg.m^2$, $J_2 = 0.2kg.m^2$, nhiễu đầu vào tổng có dạng:

$$\tau_c = [2\sin(3t) + 3\sin(2\pi t); 3\cos(2t) + 2\cos(3\pi t)].$$

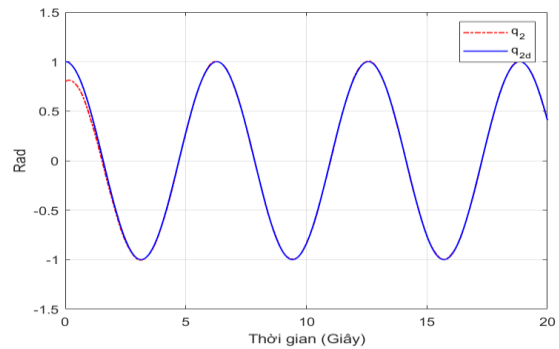
Quỹ đạo đặt được chọn như sau:

$$q_d = \begin{bmatrix} q_{1d} \\ q_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(t) \\ \cos(t) \end{bmatrix}.$$

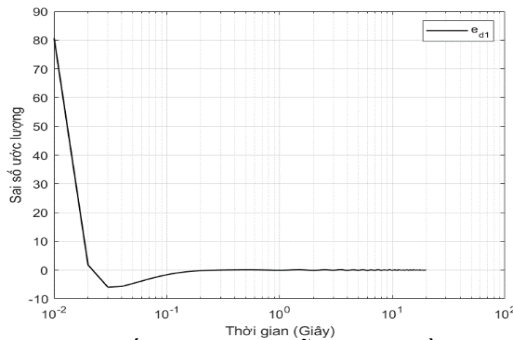
Kết quả mô phỏng thể hiện từ Hình 1 đến Hình 7.



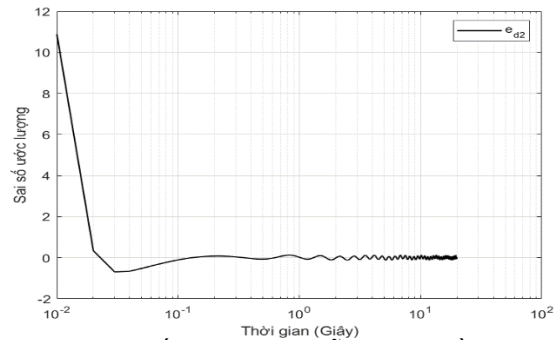
Hình 1. Góc khớp 1 và quỹ đạo đặt



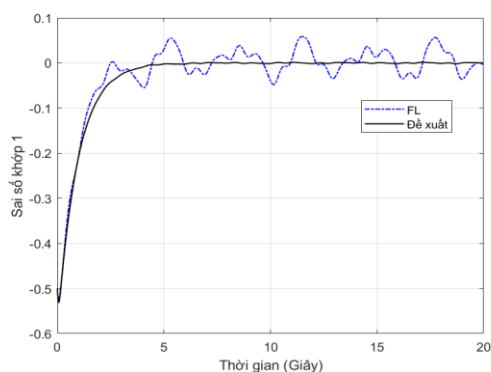
Hình 2. Góc khớp 2 và quỹ đạo đặt



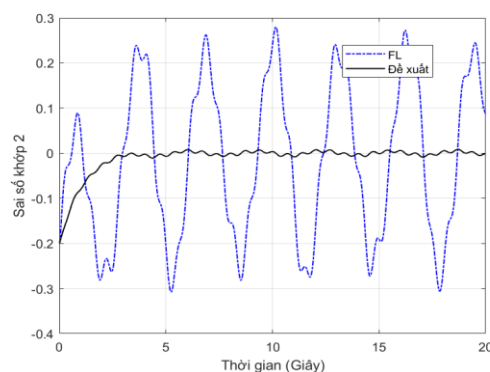
Hình 3. Sai số ước lượng nhiễu thành phần thứ nhất



Hình 4. Sai số ước lượng nhiễu thành phần thứ hai

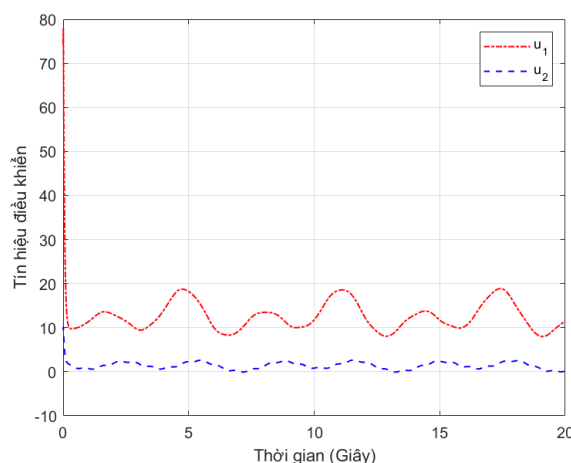


Hình 5. Sai số bám cho khớp 1



Hình 6. Sai số bám cho khớp 2

Trong đó các góc khớp thứ nhất và thứ 2 (q_1, q_2) và các giá trị đặt của chúng được thể hiện trong hình 1 và hình 2. Ta thấy các góc khớp bám theo quỹ đạo đặt với sai số (của phương pháp đề xuất) nhỏ hơn so với sai số của phương pháp điều khiển tuyến tính hóa phản hồi (FL) như trong hình 5 và hình 6. Như vậy bộ điều khiển đề xuất (13) cho chất lượng điều khiển tốt hơn so với phương pháp điều khiển tuyến tính hóa phản hồi (4) khi có bất định mô hình và nhiễu tác động. Sai số ước lượng các nhiễu thành phần được thể hiện trong các hình 3 và hình 4. Chúng tiến tới không sau khoảng 0,1 giây.



Hình 7. Tín hiệu điều khiển

Tín hiệu điều khiển thể hiện trong hình 7. Các tín hiệu điều khiển này lớn trong khoảng thời gian đầu sau đó dao động trong khoảng $0 \div 20$.

4. Kết luận

Trong bài báo này, một bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi kết hợp với bộ ước lượng nhiễu đã được đề xuất cho cánh tay máy có mô hình bất định và nhiễu tác động. Sai số điều khiển bám hội tụ về tập hút và bị chặn. Mô phỏng với cánh tay máy phẳng hai thanh đã được thực hiện và so sánh với phương pháp điều khiển tuyến tính hóa phản hồi. Kết quả cho thấy, bộ điều khiển đề xuất đã cho chất lượng điều khiển tốt hơn. Nghiên cứu tiếp theo sẽ thử nghiệm bộ điều khiển đề xuất trên cánh tay máy thực để đánh giá tính ứng dụng của bộ điều khiển này.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam, thông qua đề tài B2022-BKA-01. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn các phản biện và ban biên tập của tạp chí.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot manipulator control theory and practice*, Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [2] N. T.-T. Vu, N. P. Tran, and N. H. Nguyen, "Adaptive neuro-fuzzy inference system based path planning for excavator arm," *Journal of Robotics*, vol. 2018, pp. 1-7, 2018.
- [3] E. G. Gilbert and I. J. Ha, "An approach to nonlinear feedback control with applications to robotics," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-14, no. 6, pp. 879–884, 1984.
- [4] S. Arimoto and F. Miyazaki, "Stability and robustness of PD feedback control with gravity compensation for robot manipulators," *Robot. Theory Pract.*, vol. 3, pp. 67–72, Dec. 1986.
- [5] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man, "Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators," *Automatica*, vol. 38, no. 12, pp. 2159-2167, 2002.
- [6] M. Boukattaya, H. Gassara, and T. Damak, "A global time-varying sliding-mode control for the tracking problem of uncertain dynamical systems," *ISA Transactions*, vol. 97, pp. 155-170, 2020.
- [7] F. Lewis, W. Jagannathan, and S. Yesildirak, *Neural network control of robot manipulators and non-linear systems*, CRC Press, 2020.
- [8] T. T. Cao, N. H. Nguyen, and P. D. Nguyen, "A model-free controller for uncertain robot manipulators with matched disturbances," *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 166-176, 2023.
- [9] W. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-observer-based control and related methods—An overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1083-1095, 2016.
- [10] P. D. Nguyen and N. H. Nguyen, "A simple approach to estimate unmatched disturbances for nonlinear non-autonomous systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 32, no. 17, pp. 9160-9173, 2022.