

Điều khiển thích nghi với sơ đồ không đệ quy cho hệ thống robot

Luu Thị Huệ¹, Trần Thị Nhung², Nguyễn Tùng Lâm^{3*}

¹Trường Đại học Điện lực, 235 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định, Đường Phủ Nghĩa, Thành phố Nam Định, Nam Định, Việt Nam;

³Trường Điện-Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: lam.nguyentung@hust.edu.vn

Nhận bài: 29/1/2024; Hoàn thiện: 23/5/2024; Chấp nhận đăng: 12/8/2024; Xuất bản: 25/8/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.97.2024.25-32>

TÓM TẮT

Trong bài báo này, tác giả xem xét thiết kế bộ điều khiển thích nghi cho hệ thống robot với các tham số của hệ thống là bất định. Một bộ điều khiển thích nghi không đệ quy mới được thiết kế để xuất cho hệ thống robot đơn, với hệ số điều khiển thay đổi và được cập nhật theo thời gian nhằm không cần đến thiết kế một công cụ để ước lượng các tham số bất định của mô hình. Bộ điều khiển được phân tích và chứng minh ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov. Sai số quỹ đạo chuyển động của các khớp và tất cả các tham số trong vòng điều khiển kín hội tụ tiệm cận về gốc và bị chặn. Cuối cùng, mô phỏng được thực hiện để xác minh tính khả thi và hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất.

Từ khóa: Robot; Điều khiển thích nghi; Thiết kế điều khiển không đệ quy; Tham số số bất định của hệ thống.

1. MỞ ĐẦU

Robot được ứng dụng rất nhiều trong hệ thống công nghiệp: như phun men, hàn, lắp ráp thiết bị điện tử,... Robot làm việc trong các hệ thống công nghiệp vì vậy chịu ảnh hưởng nhiều của nhiễu ngoài, ngoài ra các tham số của mô hình robot là bất định. Song song với sự phát triển của cơ khí chính xác cho robot, thì điều khiển cho hệ thống robot cũng được quan tâm đến không kém nhằm cải tiến giúp hệ thống robot làm việc ngày một tốt hơn. Điều khiển cho hệ thống robot đã được rất nhiều các nhà khoa học quan tâm và phát triển. Như bộ điều khiển PD, PID đã được phát triển trong [1, 2], các bộ điều khiển này kế thừa bộ điều khiển truyền thống, nhưng cải tiến thêm bộ điều khiển bền vững để loại bỏ những ảnh hưởng của nhiễu ngoài lên hệ thống, giúp bộ điều khiển đạt được hiệu suất bám tốt hơn. Ngoài ra, còn có bộ điều khiển trượt được phát triển trong [3, 4], các trạng thái của sai số điều khiển hội tụ đến một vùng nhỏ tùy ý có tâm ở gốc tọa độ. Trong [5], bộ điều khiển chế độ trượt đầu cuối nhanh bậc phân số được phát triển để giải quyết vấn đề bám quỹ đạo khi robot phải chịu sự bất định và nhiễu ngoài. Để loại bỏ nhiễu ngoài tác động lên hệ thống bộ điều khiển bền vững đã được phát triển trong [6], bộ điều khiển sử dụng lý thuyết dựa trên Lyapunov về sự ổn định được đảm bảo của các hệ thống bất định. Hệ thống robot có tham số bất định, vì vậy, các bộ điều khiển thích nghi trong [7-11] đã được nghiên cứu và phát triển để giải quyết vấn đề này. Trong [7], bộ điều khiển thích nghi mờ - nơ ron truyền ngược đã điều khiển chính xác và hiệu quả cao đối với các robot có đặc tính động phức tạp đồng thời giảm chi phí điều khiển. Bộ điều khiển thích nghi trong không gian làm việc cho robot được phát triển trong [8], đã khắc phục được sự bất định và giảm hiện tượng chattering thường xảy ra trong quá trình điều khiển. Bộ điều khiển thích nghi mờ - nơ ron kết hợp với bộ điều khiển PID đề xuất trong [9], đảm bảo sai số điều khiển của hệ thống hội tụ khi hệ thống bất định và ảnh hưởng của nhiễu ngoài. Để nâng cao độ chính xác điều khiển của bộ điều khiển robot, phương pháp điều khiển trượt kết hợp với thích nghi nơ ron được đề xuất trong [10, 11], các phần bất định của hệ thống được ước lượng bằng mạng nơ ron với luật học trực tuyến. Sự kết hợp cả điều khiển thích nghi và điều khiển bền vững trong một bộ điều khiển để giải quyết cả hai vấn đề: hệ thống bất định và nhiễu ngoài được đề xuất trong một số nghiên cứu sau. Trong [12] trình bày bộ điều khiển phân cấp cho

robot, đầu tiên bộ điều khiển thích nghi để đạt được lực tương tác mong muốn khi không biết khối lượng vật thể, tiếp theo bộ điều khiển thích nghi bền vững có tính đến lực tương tác mong muốn trong động lực học của robot. Bộ điều khiển thích nghi bền vững trong [13] đã phát triển dựa trên bộ lọc phụ để đưa ra tham số tuyến tính cho hệ thống mà không sử dụng phép đo tín hiệu gia tốc. Bộ điều khiển trượt kết hợp thích nghi logic mờ được đề xuất trong [14] điều khiển bám quỹ đạo của robot trong không gian làm việc, bộ điều khiển trượt có tác dụng với nhiễu ngoài, bộ điều khiển thích nghi dựa trên logic mờ để xấp xỉ thành phần bất định của hệ thống. Trong [15], bộ điều khiển trượt với thời gian tác động nhanh không đơn lẻ (NFTSM) dựa trên mạng nơ ron Wavelet (WNN) được đề xuất. Mạng Wavelet được sử dụng để ước lượng giới hạn trên của bất định và nhiễu ngoài, sai số quỹ đạo hội tụ về không trong một khoảng thời gian hữu hạn.

Tất cả các bộ điều khiển thích nghi hay điều khiển thích nghi bền vững ở trên đều cho thấy bộ điều khiển được thiết kế phức tạp, yêu cầu tài nguyên tính toán lớn. Để giải quyết vấn đề này, trong bài này, một sơ đồ điều khiển mới không đệ quy được đề xuất cho hệ thống robot trong đó tất cả các tham số hệ thống đều được cho là chưa biết. Đóng góp chính của bài viết có thể được tóm tắt như sau:

- Bộ điều khiển không đệ quy mới cùng với bộ ước lượng một tham số được thiết kế cho các hệ thống robot mà không cần đến thiết kế công cụ để ước lượng các tham số bất định của mô hình.
- Trong hệ thống có nhiều tham số bất định, nhưng chỉ cần ước lượng một tham số cần thiết. Do đó, tài nguyên tính toán được tiết kiệm.

Phần còn lại của bài viết gồm: Hình thành bài toán điều khiển và mô hình động lực học của hệ thống được trình bày trong phần 2. Bộ điều khiển thích nghi, bộ ước lượng một tham số và phân tích ổn định cho hệ thống robot được thiết kế trong phần 3. Kết quả mô phỏng được trình bày trong phần 4. Cuối cùng, kết luận của nghiên cứu trình bày ở phần 5.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Mô hình động lực học của robot được mô tả như phương trình sau [16]:

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

với: $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ là ma trận quán tính có kích thước $n \times n$; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận tương hỗ và ly tâm, được xác định từ ma trận $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ dựa vào tính chất $\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là trận đối xứng lệch, có kích thước $n \times n$; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ là véc tơ trọng trường có kích thước $n \times 1$; $\boldsymbol{\tau}$ là véc tơ mô men tác động lên các khớp của tay máy có kích thước $n \times 1$; $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ là véc tơ vị trí, vận tốc, gia tốc của các khớp có kích thước $n \times 1$.

Từ phương trình (1), mô hình động lực học của tay máy được viết lại như sau:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q})(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q})) \quad (2)$$

Đặt biến trạng thái $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}$; $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$, khi đó, động lực học ban đầu của hệ thống tay máy có thể được sắp xếp lại thành:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}_1)(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 - \mathbf{G}(\mathbf{x}_1)) \end{cases} \quad (3)$$

Mục tiêu điều khiển của bài viết này là điều khiển chuyển động của các khớp theo một quỹ đạo tới vị trí mong muốn \mathbf{q}_d . Các biến trạng thái của hệ thống được định nghĩa như sau: $\mathbf{x}_d = \mathbf{q}_d$: vị trí mong muốn; $\boldsymbol{\phi}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_d$: sai số vị trí của các góc khớp; $\boldsymbol{\phi}_2 = \mathbf{x}_2$: vận tốc các khớp; $\mathbf{u} = \boldsymbol{\tau}$: tín hiệu điều khiển. Sai số động lực học cho (3) được xác định như sau:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \phi_2 - \dot{x}_d \\ \dot{\phi}_2 = \mathbf{H}^{-1}(\phi_1)\mathbf{u} + \mathbf{h}_2(\phi_1, \phi_2) \end{cases} \quad (4)$$

với $\mathbf{h}_2(\phi_1, \phi_2) = -\mathbf{H}^{-1}(\phi_1)(\mathbf{C}(\phi_1, \phi_2)\phi_2 + \mathbf{G}(\phi_1))$.

Do sự tồn tại của các tham số chưa biết trong ma trận \mathbf{H}^{-1} , (4) được viết lại thành:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \mathbf{H}^{-1}(\phi_1)\phi_2 + f_1(\phi_1, \phi_2) \\ \dot{\phi}_2 = \mathbf{H}^{-1}(\phi_1)\mathbf{u} + f_2(\phi_1, \phi_2) \end{cases} \quad (5)$$

với:

$$\begin{aligned} f_1(\phi_1, \phi_2) &= (\mathbf{I} - \mathbf{H}^{-1}(\phi_1))\phi_2 - \dot{x}_d \\ f_2(\phi_1, \phi_2) &= -\mathbf{H}^{-1}(\phi_1)(\mathbf{C}(\phi_1, \phi_2)\phi_2 + \mathbf{G}(\phi_1)) \end{aligned} \quad (6)$$

\mathbf{I} là ma trận đơn vị có kích thước $n \times n$.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VÀ THAM SỐ ƯỚC LƯỢNG

3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Trong phần này, bộ điều khiển thích nghi không đệ quy và bộ ước lượng tham số sẽ được thiết kế dựa trên chiến lược điều khiển một bước, để điều khiển vị trí của các góc khớp bả theo một quỹ đạo đặt cho trước tới vị trí mong muốn. Phương pháp thiết kế điều khiển không đệ quy này đảm bảo hệ thống ổn định toàn cục ngay cả khi hệ thống có các tham số là bất định. Nhưng lại không cần đến bất cứ công cụ nào như: ma trận hồi quy, mạng nơ ron hay logic mờ,... để ước lượng các tham số bất định của hệ thống. Điều này có thể thấy rằng, bộ điều khiển sẽ được thiết kế với luật điều khiển đơn giản, độ tin cậy cao, giảm gánh nặng về tính toán và thời gian. Để thiết kế bộ điều khiển, trước hết đặt:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{K}_1 & -\mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

với $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n})$; $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2n})$ là các ma trận hằng số xác định dương sao cho \mathbf{A} là ma trận Hurwitz, \mathbf{P} là ma trận xác định dương thỏa mãn phương trình Lyapunov sau:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I}_p \quad (8)$$

trong đó, \mathbf{I}_p là ma trận đơn vị có kích thước $2n \times 2n$. Để tiếp tục, một phép biến đổi biến được thực hiện như sau:

$$\mathbf{e}_i = \frac{\phi}{(L)^i}, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

trong đó, L là tham số thay đổi theo thời gian với điều kiện ban đầu $L(0) = 1$. Từ (9), hệ ban đầu (5) được biến đổi thành:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{H}^{-1}(\phi_1)L\mathbf{e}_2 + \frac{1}{L}f_1(\phi_1, \phi_2) - \frac{\dot{L}}{L}\mathbf{e}_1 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 = \frac{\mathbf{H}^{-1}(\phi_1)}{L^2}\mathbf{u} + \frac{1}{L^2}f_2(\phi_1, \phi_2) - \frac{2\dot{L}}{L}\mathbf{e}_2 \end{cases} \quad (10)$$

Định nghĩa $\mathbf{e} = [\mathbf{e}_1^T, \mathbf{e}_2^T]^T$, và ứng viên hàm Lyapunov được lựa chọn

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (11)$$

Bộ điều khiển được đề xuất như sau:

$$\mathbf{u} = -L^2 \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\phi} - L \mathbf{K}_2 \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (12)$$

Tham số L thay đổi theo thời gian, được cập nhật với luật cập nhật như sau:

$$\dot{L} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (13)$$

3.2. Phân tích ổn định

Hệ thống vòng kín được thiết lập ổn định, sẽ chỉ ra rằng với bộ điều khiển (14), hệ kín (10) sẽ hội tụ tiệm cận về gốc tọa độ.

Hệ (10) được viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{M}^{-1} L \mathbf{A} \mathbf{e} + f(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} \quad (14)$$

với $\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & \mathbf{0}_{n \times n} \\ \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1, 2, \dots, 2)$ là ma trận đường chéo có chiều $2n \times 2n$;

$f(\boldsymbol{\phi}, L) = \left[\frac{1}{L} f_1^T(\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2), \frac{1}{L^2} f_2^T(\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2) \right]^T$, khi đó, đạo hàm của hàm Lyapunov (11) xác định được như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{e}} \\ &= \left[\mathbf{M}^{-1} L \mathbf{A} \mathbf{e} + f(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} \right]^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \left[\mathbf{M}^{-1} L \mathbf{A} \mathbf{e} + f(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} \right] \\ &= L \mathbf{e}^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} + 2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} f(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L} \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda}) \mathbf{e} \end{aligned} \quad (15)$$

Theo (8), phương trình (15) có được như sau:

$$\dot{V} = -L \mathbf{e}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e} + 2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} f(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L} \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda}) \mathbf{e} \quad (16)$$

Giả thiết 1: Tồn tại một hằng dương γ sao cho $|f_i(\cdot)| \leq \gamma \sum_{j=1}^i |\boldsymbol{\phi}_j|$, $j \in \mathbb{N}_{1:2}$

Do $\dot{L} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \geq 0$ và L có điều kiện đầu $L(0) = 1$, vì vậy, tham số thay đổi theo thời gian $L(t) \geq 1$. Theo **Giả thiết 1** và (9) có được:

$$\left| \frac{f_i(\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2)}{L} \right| \leq \frac{\gamma}{L} (|\boldsymbol{\phi}_1| + |\boldsymbol{\phi}_2|) \leq \gamma (|e_1| + |e_2|) = \gamma \mathbf{Q}_i |e| \quad (17)$$

trong đó, $\mathbf{Q}_i = [I_{n \times n}, I_{n \times n}]$.

Theo (17) có được nhận định về $f(\boldsymbol{\phi}, L)$ như sau:

$$|f(\boldsymbol{\phi}, L)| \leq \gamma \mathbf{Q} |e| \quad (18)$$

với $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1; \mathbf{Q}_2]$.

Theo (18) xét $2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} f(\boldsymbol{\phi}, L)$ trong (16) có được:

$$2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} f(\boldsymbol{\phi}, L) \leq |2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} f(\boldsymbol{\phi}, L)| \leq 2 \gamma |\mathbf{e}^T| \|\mathbf{P}\| \mathbf{Q} |e| \leq 2 \gamma \|\mathbf{P}\| \|\mathbf{Q}\| \mathbf{e}^T \mathbf{e} \leq 4 \gamma \|\mathbf{P}\| \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (19)$$

Theo (19) đạo hàm của hàm Lyapunov (16) có được:

$$\dot{V} \leq -L e^T M^{-1} e + 4\gamma \|P\| e^T e - \frac{\dot{L}}{L} e^T (\Lambda^T P + P \Lambda) e \quad (20)$$

Do $\dot{L} = e^T e \geq 0$, vì vậy: $-\frac{\dot{L}}{L} e^T (\Lambda^T P + P \Lambda) e \leq 0$. M^{-1} là ma trận nghịch đảo của ma trận quán tính của robot, là một ma trận xác định dương. Do đó, ta có:

$$\dot{V} \leq -\left(L \lambda_{\min}(M^{-1}) - 4\gamma \|P\|\right) e^T e \quad (21)$$

Trong đó, $\lambda_{\min}(M^{-1})$ là trị riêng nhỏ nhất của M^{-1} ; $L(t)$ là hằng số xác định dương thỏa mãn điều kiện:

$$L(t) \geq \frac{(4\gamma \|P\| + 1)}{\lambda_{\min}(M^{-1})} \quad (22)$$

Do vậy:

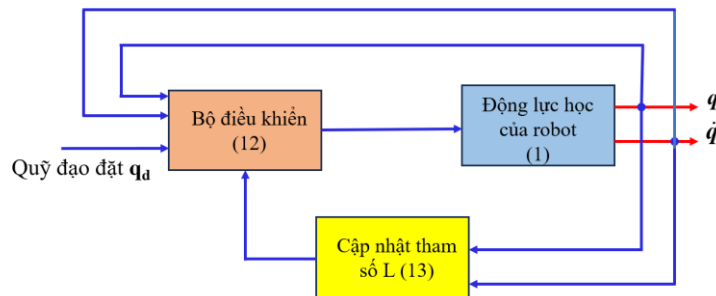
$$\dot{V} \leq -e^T e \leq 0 \quad (23)$$

Từ (11) và (23) suy ra được e bị chặn khi $t \rightarrow \infty$. Do đó, ϕ ($\phi = [\phi^T, \dot{\phi}^T]^T$) cũng bị chặn khi $t \rightarrow \infty$. Điều này có nghĩa tất cả các tín hiệu của hệ thống vòng kín là bị chặn và $L(t)$ cũng bị chặn. Do vậy, ta có:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \phi = 0 \quad (24)$$

Như vậy, bộ điều khiển đảm bảo sai số điều khiển vị trí sẽ hội tụ tiệm cận về không, vận tốc chuyển động của các khớp sẽ hội tụ về không khi các góc khớp di chuyển tới vị trí mong muốn.

Để minh họa rõ hơn quá trình điều khiển của bộ điều khiển thích nghi không đệ quy và bộ ước lượng tham cho hệ thống robot đơn, sơ đồ khối của bộ điều khiển này được minh họa trong sơ đồ hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối điều khiển hệ thống robot đơn.

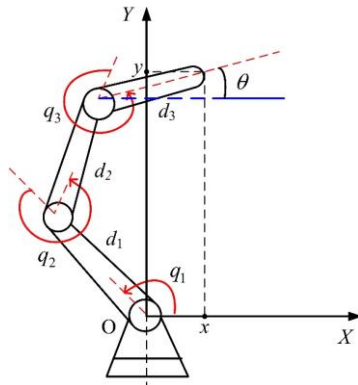
4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Để xác minh tính hiệu quả của bộ điều khiển, không làm mất tính tổng quát tác giả đi mô phỏng hệ thống robot đơn là robot Planar có ba bậc tự do quay trong mặt phẳng. Mô hình của robot planar được minh họa như hình 2.

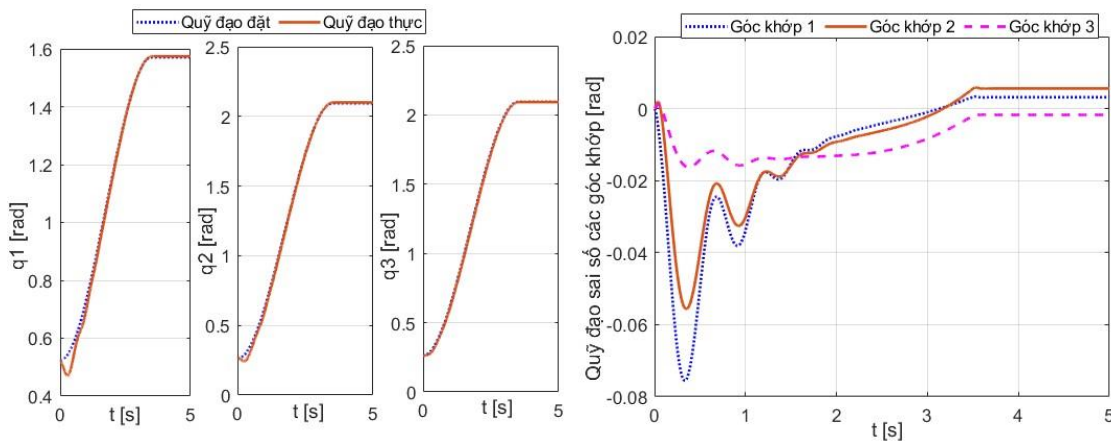
Các thông số của robot Planar: $m_1 = 1,5\text{kg}$; $m_2 = 1,2\text{ kg}$; $m_3 = 1\text{kg}$; $d_1 = 1\text{m}$; $d_2 = 0,8\text{m}$; $d_3 = 0,6\text{m}$. Mục tiêu điều khiển là điều khiển chuyển động của các khớp từ vị trí ban đầu $q_0 = [\pi / 6; \pi / 12; \pi / 12]$ theo một quỹ đạo tới vị trí mong muốn $q_f = [\pi / 2; 2\pi / 3; 2\pi / 3]$. Quỹ đạo chuyển động của các khớp được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} q_{d1} = 0,5236 + 0,2565 t^2 - 0,0488 t^3 \\ q_{d2} = 0,2618 + 0,4488 t - 0,0855 t^2 \\ q_{d3} = 0,2618 + 0,4488 t - 0,0855 t^2 \end{cases} \text{ với } t < 3,5 \text{ s và } \begin{cases} q_{d1} = \pi / 2 \\ q_{d2} = 2\pi / 3 \\ q_{d3} = 2\pi / 3 \end{cases} \text{ với } t \geq 3,5 \text{ s}$$

Các tham số điều khiển được chọn như sau: $K_1 = \text{diag}(900, 500, 500)$; $K_2 = \text{diag}(30, 20, 15)$; tham số bất định, thay đổi theo thời gian được thiết kế với giá trị ban đầu $L(0) = 1$.



Hình 2. Mô hình robot Planar.



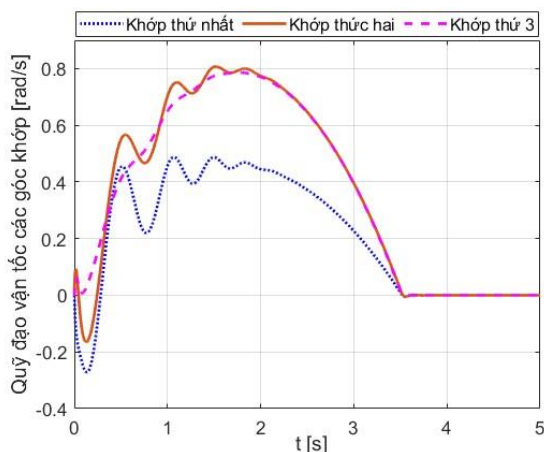
Hình 3. Quỹ đạo chuyển động các góc khớp.

Hình 3 thể hiện sự bám quỹ đạo chuyển động của các góc khớp và hội tụ của sai số quỹ đạo về không khi các khớp chuyển động tới vị trí mong muốn. Hình 4 cho thấy sự hội tụ của quỹ đạo vận tốc các khớp \dot{q} , tại vị trí cân bằng vận tốc các khớp hội tụ về không. Hình 5 là tín hiệu mô men điều khiển tác động lên các khớp, tại vị trí cân bằng mô men được hội tụ. Hình 6, hình 7 cho thấy $L(t)$ thay đổi theo thời gian, và sự cập nhật cũng như sự hội tụ của tham số này. Luật cập nhật hội tụ về không, tham số $L(t)$ hội tụ về một giá trị khi robot chuyển động tới vị trí mong muốn, điều này cho thấy, khi hệ thống làm việc ổn định tại vị trí cân bằng thì tham số thay đổi theo thời gian của hệ thống $L(t)$ giữ không đổi. Qua các kết quả mô phỏng thấy được rằng, với bộ điều khiển thích nghi không đệ quy được đề xuất cho hệ thống robot đơn, các khớp của tay máy được chuyển động tiệm cận theo quỹ đạo tới vị trí mong muốn, các tín hiệu của hệ thống kín đều hội tụ. Như vậy, bộ điều khiển hoạt động hiệu quả và khả thi.

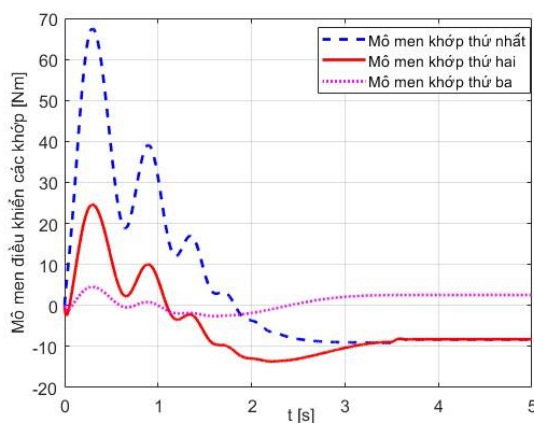
5. KẾT LUẬN

Bài báo xem xét điều khiển hệ thống robot đơn với các tham số của hệ thống là bất định. Một bộ điều khiển thích nghi không đệ quy được đề xuất cho hệ thống robot với hệ số điều khiển thay

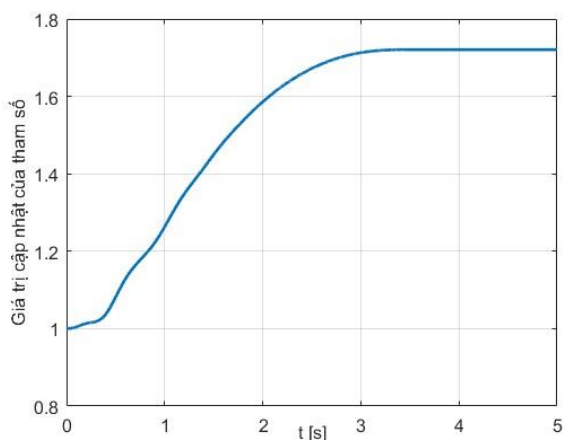
đổi theo thời gian. Với bộ điều khiển này không cần xem xét tới các công cụ để ước lượng cho các tham số bất định của hệ thống. Thay vào đó, một hệ số điều khiển thay đổi theo thời gian được thiết kế với giá trị được cập nhật theo luật cập nhật. Điều này giúp giảm thời gian tính toán cho bộ điều khiển, cũng như làm cho bộ điều khiển trở lên đơn giản hơn, làm tăng khả năng ứng dụng vào thực tiễn của bộ điều khiển. Bộ điều khiển được chứng minh sai số quỹ đạo chuyển động của các góc khớp hội tụ tiệm cận về không, và toàn bộ tín hiệu trong vòng điều khiển kín đều bị chặn. Cuối cùng, kết quả mô phỏng được thực hiện đã xác minh tính khả thi và hiệu quả của các phương pháp đề xuất.



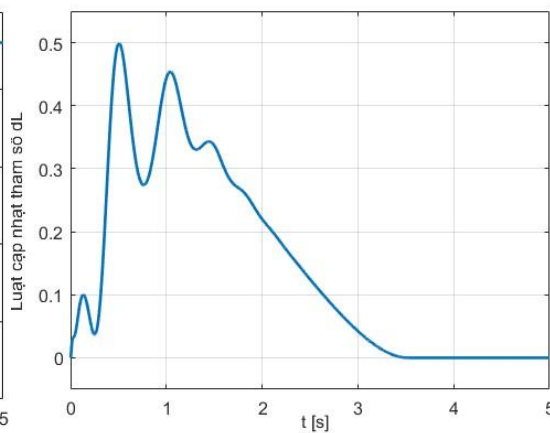
Hình 4. Quỹ đạo vận tốc các góc khớp.



Hình 5. Mô men điều khiển các khớp.



Hình 6. Quỹ đạo của hệ số điều khiển L .



Hình 7. Luật cập nhật tham số \dot{L} .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhen, ShengChao, et al. "A new PD based robust control method for the robot joint module." Mechanical Systems and Signal Processing 161: 107958, (2021).
- [2]. Azeez, Muhammad I., and Khaled R. Atia. "Modeling of PID controlled 3DOF robotic manipulator using Lyapunov function for enhancing trajectory tracking and robustness exploiting Golden Jackal algorithm." ISA transactions (2023).
- [3]. Zhang, Beibei, et al. "Sliding mode control for nonlinear manipulator systems." IFAC-PapersOnLine 50.1: 5127-5132, (2017).
- [4]. Zhao, Dongya, Shaoyuan Li, and Feng Gao. "A new terminal sliding mode control for robotic manipulators." International Journal of control 82.10: 1804-1813, (2009).

-
- [5]. Chaudhary, Km Shelly, and Naveen Kumar. "Fractional order fast terminal sliding mode control scheme for tracking control of robot manipulators." *ISA transactions* 142: 57-69, (2023).
- [6]. Spong, Mark W. "On the robust control of robot manipulators." *IEEE Transactions on automatic control* 37.11: 1782-1786, (1992).
- [7]. Zheng, Kunming, et al. "Adaptive memetic differential evolution-back propagation-fuzzy neural network algorithm for robot control." *Information Sciences* 637: 118940, (2023).
- [8]. Elmogy, Ahmed, and Wael Elawady. "An adaptive continuous sliding mode feedback linearization task space control for robot manipulators." *Ain Shams Engineering Journal* 15.1: 102284, (2024).
- [9]. Barhaghtalab, Mojtaba Hadi, et al. "Design of an adaptive fuzzy-neural inference system-based control approach for robotic manipulators." *Applied Soft Computing* 149: 110970, (2023).
- [10]. Massou, Siham, and Ismail Boumhidi. "Adaptive control based neural network sliding mode approach for two links robot." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 14.4: 2546-2556, (2023).
- [11]. Ahsan, Muhammad, Mostafa M. Salah, and Ahmed Saeed. "Adaptive Fast-Terminal Neuro-Sliding Mode Control for Robot Manipulators with Unknown Dynamics and Disturbances." *Electronics* 12.18: 3856, (2023).
- [12]. Liu, Yueyue, et al. "On a hierarchical adaptive and robust inverse dynamic control strategy with experiment for robot manipulators under uncertainties." *Control Engineering Practice* 138: 105604, (2023).
- [13]. Huang, Yichi, et al. "Robust Adaptive Control for Robotic System with External Disturbance and Guaranteed Parameter Estimation." *IFAC-PapersOnLine* 55.38: 178-183, (2022).
- [14]. Yin, Xiuxing, Li Pan, and Shibo Cai. "Robust adaptive fuzzy sliding mode trajectory tracking control for serial robotic manipulators." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 72: 101884, (2021).
- [15]. Jouila, Ameni, and K. Nouri. "An adaptive robust nonsingular fast terminal sliding mode controller based on wavelet neural network for a 2-DOF robotic arm." *Journal of the Franklin Institute* 357.18: 13259-13282, (2020).
- [16]. J. J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Pearson Education International, third Edition (2005).

ABSTRACT

Adaptive control with non-recursive schemes for robot systems

In this paper, the authors consider the design of adaptive controllers for robot systems with uncertain system parameters. A new non-recursive adaptive controller is proposed for a robot system, with the controller coefficients being time-varying and updated online to avoid the need for an estimator to estimate the uncertain model parameters. The controller is analyzed and shown to be stable in the Lyapunov theory. The tracking error of the joint trajectories and all the parameters in the closed-loop system converge asymptotically to the origin and are bounded. Finally, simulations are performed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control method.

Keywords: Robot; Adaptive control; Non-recursive control design; Unknown system parameters.